



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R6:1979**

**Förhandsbestämning  
av stegljudsnivå vid  
anisotropa och isotropa  
bjälklag**

**Jörgen Svensson**

**Byggforskningen**

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND  
SEKTIONEN FÖR VÄG- OCH VATTEN  
BIBLIOTEKET

R6:1979

FÖRHANDBESTÄMNING AV STEGLJUDSNIVÅ  
VID ANISOTROPA OCH ISOTROPA BJÄLKLAG

Jörgen Svensson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
730641-5 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Ingemanssons Ingenjörbyrå AB, Göteborg.

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND  
SEKTIONEN FÖR VÄG- OCH VATTEN  
BIBLIOTEKET

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R6:1979

ISBN 91-540-2962-7  
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1978 860833



## INNEHÅLL

BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER	7
1 PROBLEMBESKRIVNING	11
1.1 Fullskalebestämning av stegljudsisolering	11
1.2 Förhandsbestämning av stegljudsförbättring	12
1.3 Förhandsbestämning av stegljudsnivå	12
2 PROJEKTETS SYFTE OCH UPPLÄGGNING	13
2.1 Modellmätmetodik för bjälklag	13
2.2 Stegljudskatalog	13
3 TEORETISK BAKGRUND	15
3.1 Excitering av bjälklaget	15
3.1.1 Exciteringskraften	15
3.1.2 Vibrationshastigheten	18
3.1.3 Vibrationer hos anisotropa plattor - utbredning och dämpning	20
3.1.4 Böjstyvhet och egenfrekvenser	22
3.2 Punktimpedans hos isotropa bjälklag	26
3.3 Punktimpedans hos anisotropa bjälklag	27
3.3.1 TT-bjälklag	28
3.3.2 Kupolbjälklag	30
3.3.3 Hålbjälklag	31
3.4 Ljudfältet i rummet	33
3.4.1 Bjälklagets strålningsfaktor	34
3.4.2 Strålningsegenskaper hos anisotropa bjälklag	37
3.4.3 Stegljudsnivån i rummet	40
4 BETONGBJÄLKLAG I PRODUKTION	45
4.1 Planparallella bjälklag	46
4.2 TT-bjälklag	47
4.3 Kupolbjälklag	48
4.4 Hålbjälklag	48
4.5 Övriga bjälklag	48


5	BJÄLKLAGSMODELLER I GIPS	51
5.1	Typer och dimensioner	51
5.2	Beräknade stegljudsegenskaper	53
6	MODELLMÄTUTRUSTNING	55
6.1	Hammarapparat	55
6.2	Modellmätrum	56
6.3	Mätinstrument	58
7	MÄTFÖRFARANDE	61
7.1	Stegljudsnivåmätningar	61
7.2	Vibrationsmätningar	61
7.3	Admittansmätningar	62
8	MÄTRESULTAT	63
8.1	Stegljudsnivåer	63
8.2	Vibrationsnivåer	63
8.3	Admittanser	65
9	JÄMFÖRELSE MED TEORETISKA ANSATSER	67
10	MODELLMÄTRESULTATETS FULLSKALEAPPLIKATION	73
11	STEGLJUDSKATALOG	75
11.1	Råbjälklag	75
11.2	Stegljudsförbättring hos mjuka golvbeläggningar	75
11.3	Stegljudsnivåer med och utan mjuka golvbeläggningar	76
11.4	Jämförelser med fältmätningar	77

SNABBGUIDE

Läsarens intresseområde	Se avsnitt
Prediktering av stegljudsnivån vid kombination matta-bjälklag	Fig. 50-64 + sid. 68
Predikteringsnoggrannhet	11.4
Teoretiskt underlag	3
Modellmätningar	6, 7.1
Beräkning av stegljudsnivån	5.2, 10
Bjälklagsmarknaden	4

Stig Ingemansson, Stefan Einarsson, Sven Lindblad, Sten Ljunggren och Gunnar Widén har granskat rapportens teoridel. Sven Ingård, Lars Landström och Hans Pettersson har hjälpt till med laboratoriearbetet. Leif Åkerlöf har inventerat. Birgit Lindström har tålmodigt skrivit och rättat sida efter sida. Till alla dessa ett varmt tack!

Göteborg den 6 november 1978

  
Jörgen Svensson



## BETECKNINGAR OCH DEFINITIONER

$A_M$	Rumsabsorption	$m^2$ Sabine
$a$	Bjälklagets totala längd i x-led (längs balk)	m
$B$	Böjstyvhets per enhetsbredd	Nm
$B_P$	Subpanelens böjstyvhets per enhets- bredd	Nm
$B_x, B_y, B_{xy}$	Ortotropa bjälklagets böjstyvhets i olika riktningar (x = längs balk, y = tvärs balk)	Nm
$b$	Bjälklagets totala bredd i y-led (tvärs balk)	m
$b_b, b_1, b_2$	Balkens bredd, upptill, nertill	m
$c_L$	Longitudinalvågshastighet	m/s
$c_o$	Utbredningshastighet för ljud i luft	m/s
$D$	Diameter hos ursparingar i hålbjälklag	m
$d$	Subpanelens bredd mellan balkar	m
$E$	Elasticitetsmodulen för bjälklags- materialet	$N/m^2$
$F$	Spektraltätheten hos hammarapparatens kraftspektrum	N/Hz
$F(t)$	Tidsfunktionen för kraften från en hammare	N
$F_n$	Amplituden hos n:te Fourierkomponenten i hammarapparatens kraftspektrum	N
$f_c$	Koincidensfrekvens	Hz
$f_r$	Hammarapparatens repetitionsfrekvens	Hz

G	Skjuvmodulen för bjälklagsmaterialet	$\text{N/m}^2$
g	Tyngdkraftaccelerationen	$9,81 \text{ m/s}^2$
h	Hammarens fallhöjd	m
$h_b$	Balkens höjd	m
$h_h$	Hålbjälklagets tjocklek	m
$h_p$	Subpanelens eller den planparallella plattans tjocklek	m
I	Tröghetsmoment	$\text{m}^3$
k	Bjälklagets fjäderkonstant i exciteringspunkten	$\text{N/m}$
$L_v$	Vibrationshastighetsnivå rel. $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$	dB
$M_b$	Balkens ytvikt	$\text{kg/m}^2$
$M_p$	Subpanelens ytvikt	$\text{kg/m}^2$
$M_s$	Bjälklagets (genomsnittliga) ytvikt	$\text{kg/m}^2$
m	Hammarens massa (även heltal)	kg
n	Diffusitetskonstant (även heltal)	
P	Till bjälklaget inmatad effekt	W
$P_1, P_2$	Avstrålad akustisk effekt	w
S	Bjälklagets yta	$\text{m}^2$
s	c/c-avstånd mellan balkar (även Laplaceoperatorn s)	m
$s_h$	c/c-avstånd mellan ursparingar i hålbjälklag	m
$T_r$	Periodtiden mellan hammarstuds	s



U	Bjälklagspanelens omkrets	m
V	Vibrationshastighetens spektraltäthet i exciteringspunkten	m/s, Hz
v	Bjälklagets vibrationshastighet	m/s
$v_h$	Hammarens hastighet under kontakten med bjälklaget	m/s
$v_o$	Hammarens hastighet då den når bjälklaget	m/s
Z	Bjälklagets impedans i exciteringspunkten	Ns/m
$Z_m$	Hammarens massimpedans = $j\omega m$	Ns/m
$z_p$	Tyngdpunktsförskjutning vid ribbförstyvning	m
$\eta$	Bjälklagets skenbara förlustfaktor	
$\lambda_B$	Böjvåglängd	m
$\lambda_b$	Balkens böjvåglängd	m
$\lambda_p$	Subpanelens böjvåglängd	m
$\nu$	Poissons tal	
$\omega$	$= 2\pi f$	$s^{-1}$
$\omega_o$	$= 2\pi f_o$ där $f_o$ = resonansfrekvensen för hammare mot fjädrande underlag	$s^{-1}$
$\rho$	Densiteten hos bjälklagsmaterialet	$kg/m^3$
$\rho_o$	Densiteten hos luft	$kg/m^3$
$\tau$	Varaktigheten hos hammarens kraftpuls	s





## 1 PROBLEMBESKRIVNING

### 1.1 Fullskalebestämning av stegljudsisolering

För bestämning av stegljudsisoleringen hos ett bjälklag företas fullskalemätningar i laboratorium eller i färdig byggnad. Mätförfarande och utvärdering sker i Sverige enligt SIS 025251, 025252 och 025253. Dessa ansluter sig till internationell standard och inkluderar användningen av den i ISO R/140 specificerade hammarapparaten som ljudkälla. Ur uppmätta ljudtrycksnivåer i de sexton tersbanden 100-3150 Hz bestäms index för stegljudsnivå,  $I_1$ , normerat till 10 m<sup>2</sup> rumsabsorptionsyta.

Den förbättring ( $\Delta I_1$ ) av stegljudsisoleringen, som erhålles exempelvis genom en mjuk golvbeläggning bestäms ur skillnaden mellan stegljudsnivåerna före (råbjälklagsmätning) resp. efter påläggning av golvbeklädnaden.

Utprovningar av nya bjälklagstyper eller golvmaterial blir relativt kostsamma då varje modifiering kräver omfattande insatser i form av material, transporter och byggnadsarbeten. För hantering av fullskalebjälklag är arbetskraftskostnaderna såpass betungande att någon variationsrik försöksserie knappast blir genomförd innan bjälklaget tages i produktion.

Kostnaderna för fullskaleprov frammanar önskemålet om enkla laboratoriemetoder där olika varianter kan jämföras med rimlig noggrannhet. Laboratoriemetoderna bör också kunna ge en approximativ uppskattning av den stegljudsnivå som kan förväntas i färdig byggnad.

### 1.2 Förhandsbestämning av stegljudsförbättring

I rapport R44/1972 från Statens Råd för byggnadsforskning, Svensson (1972), beskrives en enkel mätmetod för förhandsbestämning av stegljudsförbättringen hos mjuka mattor. För bestämningen erfordras endast en liten provbit av den aktuella mattan. Mätningen är snabb att genomföra och ger en noggrannhet i bestämningen av  $\Delta I_1$  relativt homogena betongbjälklag på  $\pm 2$  dB. Mätutrustning finns hos Ingemanssons Ingenjörskontor AB i Göteborg. Metoden har även studerats av Lindblad (1974).

### 1.3 Förhandsbestämning av stegljudsnivå

Den förhandsbestämda stegljudsförbättringen kan sedan kombineras med kända råbjälksdata så att resulterande stegljudsnivå i färdig byggnad kan förutsägas. För homogena betongbjälklag finns i dagsläget gott om mätvärden som beskriver råbjälklagets stegljudsegenskaper. För anisotropa bjälklag, d.v.s. bjälklag som ej är planparallellt homogena (isotropa) utan uppstyvade eller urholkade i en eller två riktningar (ex. TT-bjälklag, hålbjälklag, kupolbjälklag), saknas däremot råbjälksdata i stor utsträckning. Möjligheterna att ur tidigare mätningar förutsäga stegljudsnivån i en byggnad under projektering motsvarar ej utbudet av olika varianter på sådana bjälklag.

Alternativet att beräkningsmässigt förutsäga stegljudsegenskaperna hos anisotropa bjälklag har hittills varit föga lockande eftersom ett stort antal parametrar är involverade och det teoretiska underlaget är svårhanterligt.

### 2.1 Modellmätmetodik för bjälklag

Som tidigare framhållits är lätthanterliga laboratoriemetoder ett önskemål då det gäller att utveckla eller jämföra olika bjälklagstyper. Detta projekt har därför som sitt ena syfte en utveckling av metodiken att genom laboratoriemätningar på gipsmodeller av bjälklag uppskatta bjälklagets stegljudsnivå i färdig byggnad. För ändamålet har använts ett modellmättrum och en hammarapparat i skala 1:4.

Modellmätningarna har betingats inte minst av de begränsade möjligheterna att teoretiskt beräkna stegljudsnivån från anisotropa bjälklag. Försöken har därför koncentrerats kring målsättningen att ge ett bidrag till kunskaperna om framför allt TT-bjälklag, hålbjälklag och kupolbjälklag.

### 2.2 Stegljudskatalog

Projektets andra syfte är att utmynna i en "katalog" som kan användas vid projekteringen av nya byggnader med avseende på stegljudsisoleringen.

I slutet av denna rapport ges därför en sammanställning över stegljudsdata för olika bjälklag. Vidare redovisas de stegljudsnivåer som kan förväntas då dessa bjälklag kombineras med olika typer av mjuka mattor.

Som hjälpmedel för framtagningen av katalogen har vid sidan av BFR-projektet utvecklats ett datorprogram som stöds dels av teoretiskt underlag, dels av empiriska data ur modellmätningarna.



## 3 TEORETISK BAKGRUND

Den teoretiska behandlingen av stegljudet är för okomplicerade strukturer såsom homogena, plan-parallella plattor relativt väldokumenterad, se t.ex. Cremer, Heckl (1967), Ver (1971), Lindblad (1968). För anisotropa bjälklagskonstruktioner där ytvikt och böjstyvhet varierar över bjälklaget saknas emellertid underlag för att på ett nöjaktigt sätt kunna beräkna förväntad stegljudsnivå. Detta gäller särskilt i övergångsområdena mellan de olika generaliserande betraktelsesätten för ribbförstyvade bjälklag. I dessa fall avses modellmätförfarandet som tillämpas i detta projekt kunna ge empiriskt underlag.

Det fysikaliska skeendet kan uppdelas i excitering av bjälklaget med hammarapparaten respektive ljudavstrålning till rummet från det vibrerande bjälklaget. Som viktiga parametrar ingår bl.a. bjälklagets punktimpedans och dess strålningsfaktor.

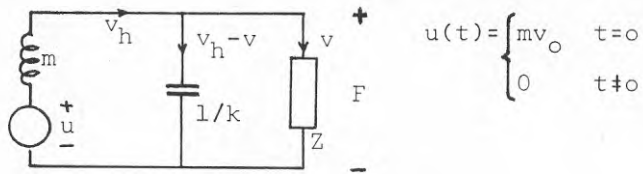
Nedan ges en översiktlig härledning av stegljudsnivån vid excitering av bjälklaget med en hammarapparat.

3.1 Excitering av bjälklaget

## 3.1.1 Exciteringskraften

Den fritt fallande hammaren med massan  $m$  och fallhöjden  $h$  har hastigheten  $v_0$  och impulsen  $mv_0 = m\sqrt{2gh}$  då den träffar bjälklaget. Hammaren möter i exciteringspunkterna bjälklagets mekaniska impedans  $Z$ . Denna punktimpedans beskrivs närmare i kapitlen 3.2 och 3.3. Bjälklaget påverkas med kraften  $F$  som ger upphov till böjvågor i bjälklagsplattan. Bjälklagets vibrationshastighet i exciteringspunkten betecknas  $v$ . Vidare sker en lokal elastisk deformation som kännetecknas av fjäder-

konstanten  $k$ . Detta kan åskådliggöras i följande ekvivalenta elektriska analogi:



Med hjälp av Laplaceoperatoren  $s$  kan kretsekvationerna formuleras:

$$\begin{cases} F = \begin{cases} mv_0 - smv_h & t=0 \\ - smv_h & t \neq 0 \end{cases} \\ F = vZ = \frac{k}{s} \cdot (v_h - v) \end{cases} \quad (3.1)$$

Härur löses bjälklagets vibrationshastighet i frekvensdomänen:

$$v(s) = \frac{mv_0}{Z} \cdot \frac{1}{1 + \frac{m}{Z}s + \frac{m}{k}s^2} \quad (3.2)$$

I tidsplanet motsvaras detta då  $Z$  kan betraktas som reell och frekvensoberoende av

$$v(t) = \frac{mv_0}{Z} \cdot \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot e^{-\zeta\omega_0 t} \cdot \sin \omega_0 t \sqrt{1-\zeta^2} \quad (3.3)$$

Lindblad (1968) har utvecklat detta enligt följande.

Ekvation 3.3 beskriver en dämpad sinussvängning med frekvensen  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  och dämpningsfaktorn  $\zeta = \frac{\omega_0 m}{2Z}$ . Förutsättningen för den periodiska lösningen är att  $\zeta^2 < 1$ , d.v.s.  $km < 4Z^2$ , vilket så gott som uteslutande är fallet i praktiken. Detta innebär att hammaren lämnar



bjälklaget efter en halvperiod, varefter lösningen upphör att gälla. Den på bjälklaget verkande kraften  $F=vZ$  förblir därefter lika med noll tills hammaren åter når bjälklaget. Förloppet upprepas med perioden  $T_r$ , varför kraften kan beskrivas av en Fourierserie. Varje term i serien representerar en diskret frekvenskomponent med amplituden  $F_n$  och frekvensen  $\frac{n}{T_r}$  varvid

$$F_n = \frac{1}{T_r} \int_0^{T_r} F(t) e^{-j\frac{2\pi n}{T_r} t} dt \quad (3.4)$$

Kraftens tidsfunktion

$$F(t) = Z \cdot v(t) \quad (3.5)$$

erhålles ur ekvation 3.3. Denna integreras under en halvperiod, d.v.s. till tiden

$$t_1 = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.6)$$

varefter  $F(t) = 0$ . Ekvation 3.4 leder då till följande uttryck för beloppet hos varje spektralkomponent, varvid vinkelfrekvensen normaliserats till

$$\Omega = \frac{2\pi n}{\omega_0 T_r}$$

$$|F_n| = \frac{mv_0}{T_r} \cdot \frac{\sqrt{1+e^{-2\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} + 2e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \cos \pi\Omega/\sqrt{1-\zeta^2}}}{\sqrt{1-2\Omega^2+4\zeta^2\Omega^2+\Omega^4}} \quad (3.7)$$

Då  $\omega_0 m \ll 2Z$ , vilket vanligen är fallet om inte bjälklaget är extremt tunnt, blir  $\zeta \ll 1$  och uttrycket för-  
enklas till

$$|F_n| = \frac{2mv_0}{T_r} \cdot \frac{\left| \cos \frac{\pi\Omega}{2} \right|}{|1-\Omega^2|} \quad (3.8)$$

Se figur 66.

Om å andra sidan bjälklagsimpedansen är låg och den lokala fjädringen styv närmar sig  $\omega_0$  värdet  $2Z$ ,  $\zeta$  går mot ett (aperiodiska gränsfallet) och ekv. 3.7 går mot

$$|F_n| = \frac{mv_0}{T_r} \cdot \frac{1}{1+\Omega^2} \quad (3.9)$$

d.v.s. ett 6 dB lägre värde än i ekv. 3.8.

En sänkning av nivån, främst vid högre frekvenser, erhålles också om underlaget som hammaren möter är behäftat med inre förluster.

Vid mätning av effektivvärde i tersband adderas de kvadrerade effektivvärdena  $(F_n/\sqrt{2})^2$  för samtliga spektralkomponenter inom tersbandets gränsfrekvenser. Bandbredden hos ett tersband som funktion av dess mittfrekvens,  $f$ , bestämmes av

$$\Delta f = 0,23 f \quad (3.10)$$

Tersbandet innehåller  $N$  spektralkomponenter där

$$N = \Delta f \cdot T_r = 0,23 f T_r \quad (3.11)$$

Hammarapparatus kraftspektrum uttryckt i tersband erhålles då ur ekv. 3.8 som

$$F_{\text{eff}}^2 = N \cdot \frac{F_n^2}{2} = 0,23 f \cdot \frac{4m^2 gh}{T_r} \cdot \frac{\cos^2 \frac{\pi \Omega}{2}}{(1-\Omega^2)^2} \quad (3.12)$$

### 3.1.2 Vibrationshastigheten

För bjälklaget bestäms vibrationshastighetens effektivvärde i tersband av

$$v_{\text{eff}} = \frac{F_{\text{eff}}}{Z} \quad (3.13)$$



Detta gäller vertikalt i exciteringspunkten. Uttryckt i logaritmiska mått erhålles vibrationshastighetsnivån ur ekv. 3.12 och 3.13 som

$$L_v = 20 \cdot \log \frac{v_{eff}}{5 \cdot 10^{-8}} = 155,6 + 10 \cdot \log \frac{m^2 h}{T_r} + 10 \cdot \log f -$$

$$-20 \cdot \log Z + 10 \cdot \log \frac{\cos^2 \frac{2\pi \cdot f}{2 \cdot f_0}}{(1 - (\frac{f}{f_0})^2)^2} \quad \text{dB} \quad (3.14)$$

relativt  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s

Här har  $\Omega$  omskrivits till  $f/f_0$  där  $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$  utgör resonansfrekvensen mellan hammaren och den lokala fjädringen i exciteringspunkten. För ett råbjälklag kan normalt den sista termen försummas inom det aktuella frekvensområdet för stegljudsisoleringen, 100-3150 Hz.

Den i exciteringspunkten inmatade effekten fördelar sig över hela bjälklaget och skapar genom reflexioner vid periferin (knutpunkterna) och övriga diskontinuiteter ett efterklangsfält uppbyggt av bjälklagets resonansmoder vid fria svängningar. Vibrationshastigheten i efterklangsfältet blir beroende av den bjälklagsmassa över vilken inmatad effekt skall fördelas, samt av de samlade energiförluster som uttrycks i skenbara förlustfaktorn. Denna är sammansatt av bjälklagets inre termiska förluster, randförluster till anslutande konstruktionerna (avtar med ökande frekvens) samt den energi som avges direkt till ljudfältet i rummet. Den sistnämnda förlusten är i sammanhanget försumbar. För en homogen platta med ytan  $S$ , ytvikten  $M_s$  och skenbara förlustfaktorn  $\eta$  erhålles yt- och tidsmedelvärdet av vibrationshastigheten i efterklangsfältet som

$$v_{eff}^{-2} = \frac{F_{eff}^2}{M_s \eta S \cdot 2\pi f} \cdot \frac{1}{\text{Re}(Z)} \quad (3.15)$$

Detta ger, om effekten av den lokala deformationen utelämnas, en frekvensberoende hastighetsnivå

$$L_v = 147,6 + 10 \cdot \log \frac{m^2 h}{T_r} - 10 \cdot \log M_s \cdot \eta \cdot S - 10 \cdot \log Z \quad \text{dB} \quad (3.16)$$

relativt  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s i tersband. Som villkor utöver redan nämnda måste gälla dels att plattjockleken understiger en sjättedels böjvåglängd, dels att tillräckligt antal plattresonanser (minst 5) förekommer inom tersbandet (se Cremer, Heckl 1967). Ett exempel på förlustfaktorernas frekvensberoende visas i figur 3. Z förutsättes reell.

### 3.1.3 Vibrationer hos anisotropa plattor - utbredning och dämpning

För anisotropa bjälklag, liksom för mycket stora homogena bjälklag, kan ett uniformt efterklangsfält ej alltid påräknas. För bjälklag med hög förlustfaktor eller stor spännvidd hinner böjvågen inte reflekteras innan den dämpas ut, vilket motverkar uppkomsten av efterklangsfältet. I dessa fall kan vibrationsfältet i exciteringspunktens omedelbara närhet bli dominerande för ljudutstrålningen. Detta gäller särskilt vid högre frekvenser.

Utbredningsförhållandena för böjvågor i en balkförestyvd platta har studerats av Heckl (1961). Bl.a. visas att i ett periodiskt balksystem med lika balkar och mellanliggande subpaneler blir dämpningen i utbredningsriktningen tvärs balk relativt liten för de frekvenser som bestäms av dels subpanelens plattresonanser i utbredningsriktningen, dels balkens böjvågsresonanser. Vibrationerna vid övriga frekvenser dämpas mera. Detta gäller då balken är tung i jämförelse med plattans ytvikt. För lättare balkar erhålles ej denna filtereffekt utan

dämpningen sker "masskontrollerat" med en monoton funktion över frekvensområdet, bestämd av följande uttryck för vibrationsnivåskillnaden mellan den exciterade plattan och en oändlig platta på andra sidan balkförstyvningarna

$$\Delta \overline{L}_V \approx 10 \cdot \log \frac{M_P \lambda^2}{2\pi M_b \lambda_b b_b} \cdot \left( 1 + 64 \frac{M_P \lambda}{2\pi M_b b_b} \right) \quad (3.17)$$

En närmare betraktelse visar att utbredningsdämpningen ökar mot höga frekvenser. Uttrycket gäller då antalet balkresonanser inom betraktat frekvensband är tillräckligt stort samt då avståndet mellan balkarna är större än subpanelens böjvåglängd. För kortare balkavstånd, se nedan.

En intressant iakttagelse är att ett avbrott i periodiciteten, exempelvis genom en vekare balk, ger en märkbar tillskottsdämpning i utbredningen. Jämför kaskadkopplade bandpassfilter, där ett av filtren har ett passband som avviker från de övriga.

Heckl (1961) visar också att vibrationshastigheten hos den exciterade subpanelen vid punktexcitering av en balkförstyvad platta får samma form som ekv. 3.16 men med en skenbar förlustfaktor

$$\eta_P = \frac{4k_b M_P}{k_P^3 d M_b b_b} \cdot \left( 1 + 64 \frac{M_P}{k_P M_b b_b} \right) \quad (3.18)$$

där  $k$  betecknar vågtalet  $\frac{2\pi}{\lambda}$  för resp. böjvågssystem. Balkförstyvningarna ger vid låga frekvenser en större dämpning av subpanelens vibrationer än vad enbart de inre förlusterna skulle ge, medan vid högre frekvenser balkarnas inverkan är försumbar. Se figur 43.

### 3.1.4 Böjstyvhet och egenfrekvenser

Då balkavståndet minskas i förhållande till böjvåglängden, eller ekvivalent då frekvenser lägre än första subpanelresonans betraktas, övergår exciteringen av det anisotropa bjälklaget till att omfatta svängningsmoder där hela bjälklaget ingår. Därvid bestäms egensvängningsfrekvenserna av genomsnittliga ytvikten  $M_s$  i förening med varierande böjstyvheter  $B_x$ ,  $B_y$  och  $B_{xy}$  i olika riktningar parallella med tryckplattan. Utbredningsdämpningen blir försumbar. Beräkningsmetoder för böjstyvheter och egensvängningsfrekvenser hos ribbbjälklag har angetts av Huffington (1956) och Hoppmann, Huffington & Magness (1956). För ett halvoändligt, fritt upplagt ribbbjälklag, där x-axeln definieras parallell med förstyvningarna, ges de olika böjstyvheter av

$$B_x = B_p + \frac{Eh_p z_p^2}{(1-\nu^2)} + \frac{EI_b}{s} \quad (3.19)$$

$$B_y = \frac{b^5}{30 \int_0^b \frac{(by-y^2)^2}{B(y)} dy} \quad (3.20)$$

$$B_{xy} = \frac{K_a' G}{4s} \quad (3.21)$$

Tröghetsmomentet  $I_b$  för balken räknas därvid liksom för subpanelen med avseende på tyngdpunktsaxeln hos tvärsnittet genom en balk-subpanel-sektion. Beteckningen  $z_p$  står för tyngdpunktsförskjutningen relativt subpanelens mittplan.

Lokala böjstyvheten i y-led (tvärs balk) uppskattas ligga mellan  $B_p$  och  $B(y)$  där

$$B_p = \frac{Eh_p^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.22)$$

$$B(y) = \frac{Eh^3(y)}{12(1-\nu^2)} \quad (3.23)$$

För överslagsberäkning bör  $SB(y)$  kunna sättas lika med  $B_p$ , varvid ekv. 3.20 övergår till

$$B_y = \frac{Eh_p^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.24)$$

$K_a$  utgör formfaktorn för en sektion i det periodiska tvärsnittet.

Bjälklagets egensvängningsfrekvenser bestäms av uttrycket

$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2\sqrt{M_s}} \sqrt{B_x \frac{m^4}{a^4} + 2B_{xy} \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + B_y \frac{n^4}{b^4}} \quad (3.25)$$

för en fritt upplagd, randstödd platta ( $m, n=1, 2, 3 \dots$ ).

Om plattan i stället är fast inspänd, vilket är fallet för ett bjälklag som ansluter fastgjutet mot tunga, bärande byggnadselement, gäller approximativt

$$f_{m,n} = \frac{q}{\sqrt{M_s}} \sqrt{B_x \frac{m^4}{a^4} + 2B_{xy} \frac{m^2 n^2}{a^2 b^2} + B_y \frac{n^4}{b^4}} \quad (3.26)$$

där faktorn  $q$  varierar med inspänningsgraden (3,1-3,5).

I förenklingarna förusättes avståndet mellan förstyrningarna vara mycket mindre än en halv böjvåglängd för subpanelerna (tryckplattan mellan balkarna).

Hos subpanelerna uppstår ett fält av egensvängningsmoder vid högre frekvenser. Första subpanelresonansen uppstår då halva böjvåglängden  $\lambda_p/2$  är ungefär lika med subpanelens bredd  $d$  mellan balkarna. Förluster förskjuter egensvängningsfrekvenserna, vilka odämpade bestäms av

$$f_{m,n} \approx q \cdot \sqrt{\frac{B_p}{M_p}} \left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{d^2} \right) \quad (3.27)$$

där  $q$  för konstruktioner där balkarna är mycket tyngre och styvare än subpanelerna antar värden mellan 3,1 och 3,5. För lättare och vekare förstuvningar blir övergången mellan de områden där bjälklagets uppförande bestäms av ekvivalenta ytvikten  $M_s$  resp. tryckplattans ytvikt  $M_p$  mera diffus. Häri ligger en väsentlig svårighet vid den teoretiska behandlingen av anisotropa bjälklag, varför empiriska metoder såsom modellförsöken i detta projekt har ett avgjort berättigande då det gäller att studera inverkan av varierad geometri hos bjälklagen.

Ovanstående betraktelser har huvudsakligen knutits till ribbförstuvade bjälklag men kan i viss utsträckning appliceras även på andra typer av anisotropa bjälklag såsom hålbjälklag och kupolbjälklag.

Antalet resonanser  $\Delta N$  inom ett studerat frekvensband  $\Delta f$  är av intresse med tanke på förbehållet till ekv. 3.15 och 3.16. Cremer, Heckl (1967) anger modtätheten för böj-svängningar i en homogen platta till

$$\frac{\Delta N}{\Delta f} = \frac{k_B^2 S}{2\omega} = \frac{\pi S}{\lambda_B^2 f} \quad (3.28)$$

Vid bandbredden lika med en ters gäller  $\frac{\Delta f}{f} = 0,23$  och antalet moder inom tersen (väl över grundresonansen) blir

$$\Delta N = 0,73 \frac{S}{\lambda_B^2} \quad (3.29)$$



För en kvadratisk yta innebär detta att sidan måste rymma minst 2,6 böjvåglängder för att  $\Delta N$  skall bli större än 5.

För böjvåglängden gäller

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{2\pi}{F}} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{M_s}} \quad (3.30)$$

Mot låga frekvenser inträffar sålunda dels att antalet moder per tersband (ex.vis) blir litet, dels att antalet spektralkomponenter inom tersbandet, härrörande från exciteringskraften, minskar. Chansen att "träffa rätt" i en mod blir lägre, särskilt om skenbara förlustfaktorn är låg och plattresonanserna därigenom smaltbandiga. Motsvarande resonemang gäller rumsmoderna i det utrymme där stegljudsnivåmätningen utföres. Totalt sett erhålles därför en relativt stor osäkerhet i stegljudsnivåbestämningen vid låga frekvenser; större ju mindre bjälklagets och mättrumets dimensioner är.

### 3.2 Punktimpedans hos isotropa bjälklag

Den mekaniska impedans som hammaren möter i nedslagspunkten bestäms av bjälklagets ytvikt och böjstyvhet. För ett isotropt bjälklag, som t.ex. en homogen, parallell platta, anges punktimpedansen av uttrycket

$$Z = 8 \cdot \sqrt{M_S B} \quad (3.31)$$

$$\text{där } M_S = \rho \cdot h_P \quad (3.32)$$

$$B = \frac{E \cdot h_P^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.22)$$

Uttrycket innebär en reell impedans och gäller för en oändlig platta, men kan direkt tillämpas även för ändliga plattor så snart modtätheten är tillräckligt hög (se ekv. 3.29). Vid lägre frekvenser får bjälklagets enskilda svängningsmoder större inverkan på punktimpedansen som då ej längre kan betraktas som en reell, frekvensoberoende storhet. Vid dessa frekvenser blir impedansen också beroende av var på bjälklagsplattan hammarapparaten placeras. Därför göres en rumsmedelvärdesbildning av olika positioner. Se även diskussionen i slutet av föregående avsnitt.

Vid högre frekvenser, dit vi i praktiken kan räkna det normala ljudisoleringsområdet 100-3150 Hz, ger rumsmedelvärdesbildningen (flera hammarapparatspositioner) såväl som frekvensmedelvärdesbildningen (tersband som täcker flera av bjälklagets egenfrekvenser) till resultat att punktimpedansen för ett ändligt bjälklag kan representeras av samma reella, frekvensoberoende uttryck som för en oändlig platta, nämligen 3.31.

Vad som sagts i detta kapitel gäller även i skalenlig proportion för subpaneler i anisotropa bjälklag, vilka vid höga frekvenser kan betraktas som separata isotropa plattor.



### 3.3 Punktimpedans hos anisotropa bjälklag

Den impedans som hammaren möter i det anisotropa bjälklaget blir beroende av om exciteringen sker på en subpanel eller på en förstyvning. I det förstnämnda fallet kan ett mera högfrekvensdominerat stegljud förväntas, se figur 1.

Om vi till en början endast betraktar låga frekvenser, kan vid tillräcklig modtätthet approximativt användas samma form av uttryck som för den massekvivalenta isotropa plattan. Bjälklaget uppträder då som en ortotrop platta, ett specialfall av anisotropi där böjvåglängden är så stor att ytvikten kan anses konstant över plattan. Punktimpedansen ges i så fall enligt Heckl av

$$Z = 8 \cdot \sqrt{M_s B} \quad (3.31)$$

där böjstyvheten erhålles ur

$$B = \sqrt{B_x B_y} \quad (3.24)$$

Vid excitering av subpanelmoderna (högre frekvenser) närmar sig impedansen

$$Z = 8 \cdot \sqrt{M_p B_p} \quad (3.33)$$

om hammarapparaten placeras mitt på en subpanel. Vibrationerna blir genom den lägre impedansen kraftigare i den exciterade subpanelen vid dessa högre frekvenser och dämpas sedan vid passagen förbi förstyvningarna. Därvid erhålles en filterverkan, som beskrivits i kap. 3.1.1. I figur 2 syns detta, särskilt vid frekvenserna 3150, 5000 och 8000 Hz.

Om hammarapparaten placeras över en förstyvande balk möter den även vid högre frekvenser en högre impedans, medförande lägre stegljudsnivå. Då mätförfarandet innebär en rumsmedelvärdesbildning över bjälklaget genom placering av hammarapparaten i fem olika positioner, kommer slutresultatet att hamna mellan dessa båda extremfall.

Böjstyvheten per enhetsbredd hos en ortotrop platta av homogent material ges av

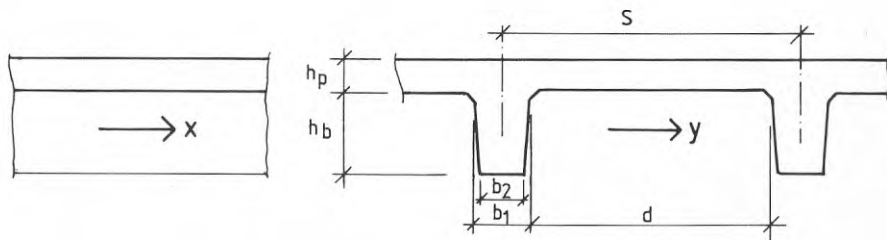
$$B = \frac{E \cdot I}{1 - \nu^2} \quad (3.34)$$

där  $I$  är tvärsnittets yttröghetsmoment per enhetsbredd med avseende på tyngdpunktsaxeln. För en period av ett tvärsnitt med periodiciteten  $s$ , sammansatt av rektangulära delelement med ytorna  $b_i \cdot h_i$ , tillämpas Steiners sats

$$I = \frac{1}{s} \sum_i \left( \frac{b_i \cdot h_i^3}{12} + b_i \cdot h_i \cdot r_i^2 \right) \quad (3.35)$$

där  $r_i$  är avståndet mellan  $i$ :te delelementets tyngdpunkt och den resulterande tyngdpunktsaxeln.

### 3.3.1 TT-bjälklag



Subpanelens ytvikt

$$M_p = \rho h_p \quad \text{kg/m}^2 \quad (3.32)$$

Bjälklagets genomsnittliga ytvikt

$$M_s = \rho h_p + \rho \frac{(b_1 + b_2) h_b}{2s} \quad \text{kg/m}^2 \quad (3.36)$$

Subpanelens böjstyvhets per enhetsbredd

$$B_P = \frac{E h_P^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Nm} \quad (3.22)$$

Bjälklagets böjstyvhets per enhetsbredd längs balk  
(jfr. 3.19)

$$B_x = \frac{E}{s(1-\nu^2)} \cdot \left( \frac{sh_P^3}{12} + sh_P z_P^2 + I_b + \frac{b_1+b_2}{2} \cdot h_b z_b^2 \right) \quad \text{Nm} \quad (3.37)$$

$$\text{där } I_b = \frac{h_b^3}{36} \cdot \frac{b_1^2+b_2^2+4b_1b_2}{b_1+b_2}$$

$$z_P = \frac{h_b}{6} \cdot \frac{3h_P(b_1+b_2)+2h_b(b_1+2b_2)}{2sh_P+h_b(b_1+b_2)}$$

$$z_b = \frac{sh_P}{3(b_1+b_2)} \cdot \frac{3h_P(b_1+b_2)+2h_b(b_1+2b_2)}{2sh_P+h_b(b_1+b_2)}$$

Bjälklagets böjstyvhets per enhetsbredd tvärs balk  
enligt Hoppmann, Huffington & Magness (1956)

$$B_y = \frac{b^5}{30 \int_0^b \frac{(by-y^2)^2}{B(y)} dy} \quad \text{Nm} \quad (3.20)$$

där  $b$  = totala bjälklagsbredden mellan upplagspunkter

$$B(y) = \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{h^3}{12} + h \left( \frac{h_P}{2} - \frac{h_P}{2} - z_P \right)^2 \right) \quad (3.38)$$

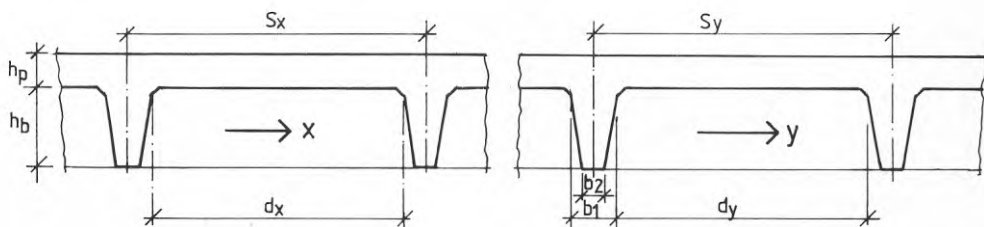
där  $h$  varierar mellan  $h_P$  och  $h_P+h_b$  som funktion av  $y$ .

Uttrycket lämpar sig för datorberäkning, varvid integrationen endast behöver utsträckas över 6 å 7 perioder i strukturen för tillräcklig noggrannhet. För överlagsberäkningar sättes

$$B_y \approx \frac{Eh_p^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.22)$$

Värdena insättes i ekv. 3.24, varefter punktimpedansen erhålles ur 3.31. Giltigheten inskränkes här liksom i det följande då antalet moder per betraktat frekvensband är litet (se ekv. 3.29 och 3.30).

### 3.3.2 Kupolbjälklag



Vi förutsätter lika dimension på balkarna i x- och y-led.

Normalt är även  $s_x = s_y = s$ ,  $d_x = d_y = d$ .

Subpanelens ytvikt:

$$M_p = \rho h_p \quad \text{kg/m}^2 \quad (3.32)$$

Bjälklagets genomsnittliga ytvikt

$$M_s = \rho h_p + \rho \cdot \frac{(b_1 + b_2) \cdot (4s - b_1 + b_2)}{4s^2} \cdot h_b \quad \text{kg/m}^2 \quad (3.39)$$

Subpanelens böjstyvhets per enhetsbredd

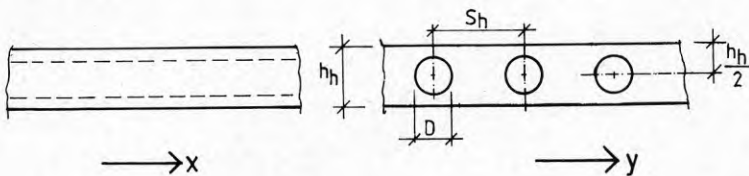
$$B_p = \frac{Eh_p^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Nm} \quad (3.22)$$

Bjälklagets böjstyvhets per enhetsbredd

$$B_x = B_y \approx B_{x_{TT}\text{-bjälklag}} \quad \text{Nm} \quad (3.40)$$

då tvärbalkarna bedöms ge försumbart styvhetsstillskott jämfört med längsbalkarna. Ev. kan  $B_{y_{TT}}$  beräknas för motsvarande konfiguration som kontroll.

### 3.3.3 Hålbjälklag



Bjälklagets genomsnittliga ytvikt

$$M_s = \rho \left( h_h - \frac{\pi D^2}{4s_h} \right) \quad \text{kg/m}^2 \quad (3.41)$$

Bjälklagets böjstyvhets per enhetsbredd längs ursparingar

$$B_x = \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{h_h^3}{12} - \frac{\pi D^4}{64s_h} \right) \quad \text{Nm} \quad (3.42)$$

Bjälklagets böjstyvhet per enhetsbredd tvärs ursparingar enligt Hoppmann, Huffington & Magness (1956)

$$B_y = \frac{b^5}{30 \int_0^b \frac{(by-y^2)^2}{B(y)} dy} \quad \text{Nm} \quad (3.20)$$

där  $b$  = totala bjälklagsbredden mellan upplagspunkter

$$B(y) = \frac{Eh_h^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{mellan ursparingarna} \quad (3.43)$$

$$B(y) = \frac{E}{12(1-\nu^2)} \left( h_h^3 - 8 \left( \frac{D^2}{4} - y_r^2 \right)^{3/2} \right) \quad (3.44)$$

inom ursparingarna

där  $y_r$  anger avståndet från hålcentrum (cylindriska ursparingar).

Uttrycket lämpar sig för datorberäkning.

### 3.4 Ljudfältet i rummet

Bjälklagets vibrationer ger genom ljudutstrålning upphov till ett ljudfält i varje anslutande rum. Vibrationerna sprider sig också till flankerande byggnadselement, vilka i sin tur bidrar till ljudfälten. Spridningen förhindras mer eller mindre om ytvikt och böjstyvhet hos det anslutande elementet väsentligt avviker från motsvarande parametrar hos bjälklaget. Likaså dämpas utbredningen i bjälklagsplanet om vibrationerna måste passera knutpunkter där tyngre och styvare väggar ansluter. Samtidigt reflekteras emellertid en större del av vibrationsenergin tillbaka till det exciterade bjälklagspartiet, vilket höjer den härifrån utstrålade ljudenergin. I det följande förutsätter vi att ljudutstrålningen till mät-rummet sker enbart från bjälklaget.

Den i rummet uppträdande ljudtrycksnivån bestäms av bjälklagets vibrationshastighet och strålningsfaktor samt av absorptionen och diffusiteten i rummet.

Bjälklaget tillföres per tersband effekten

$$P = \frac{F_{\text{eff}}^2}{Z} \quad (3.45)$$

där  $F_{\text{eff}}^2$  ges av ekv. 3.12 och  $Z$  av föregående kapitel. Denna effekt avgår, sedan stationära vibrationer uppnåtts, huvudsakligen i värme- och randförluster till en del som bestäms av skenbara förlustfaktorn  $\eta$ . En mindre del avges som akustisk effekt, dels från närfältet till exciteringsorten (under koincidensfrekvensen, se nedan):

$$P_1 = \frac{F_{\text{eff}}^2 \rho_0}{2\pi M_{sO}^2} \quad (3.46)$$



dels från efterklangsfältet:

$$P_2 = \frac{F_{\text{eff}}^2 \rho_o c_o \sigma}{Z \cdot 2\pi f \cdot M_s \cdot \eta} = \bar{v}_{\text{eff}}^2 \cdot S \cdot \rho_o c_o \cdot \sigma \quad (3.47)$$

(jfr. 3.15)

### 3.4.1 Bjälklagets strålningsfaktor

Huruvida efterklangsfältet eller närfältet dominerar i ljudutstrålningen bestäms bl.a. av strålningsfaktorn  $\sigma$ . Om närfältet skall dominera krävs att

$$\sigma \ll 1,27\eta \cdot \frac{f}{f_c} \quad (3.48)$$

Koincidensfrekvensen  $f_c$  bestäms för en isotrop platta av

$$f_c = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M_s}{B}} \quad (3.49)$$

För en anisotrop platta gäller att om avståndet mellan förstyvningarna uppgår till högst  $\lambda_B/2$  (för noggrannare analys högst  $\lambda_B/4$ ) kan genomsnittliga ytvikten  $M_s$  approximativt användas i formeln. Böjstyvheten varierar emellertid i olika riktningar som framgår av 3.19, 3.20 och 3.21, varför koincidens erhålles inom området mellan gränshfrekvenserna  $f_{cx}$  och  $f_{cy}$ .

Vid höga frekvenser, där minst halva böjvåglängden ryms mellan förstyvningarna, gäller subpanelens ytvikt och böjstyvhet, varför

$$f_{cp} = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M_p}{B_p}} \quad (3.50)$$

Strålningsfaktorns storlek är avhängig av koincidensfrekvensen på i stort sett följande vis:



$$\left\{ \begin{array}{ll} \sigma \ll 1 & \text{för } f \ll f_c \\ \sigma > 1 & \text{för } f = f_c \\ \sigma = 1 & \text{för } f \gg f_c \end{array} \right.$$

Den låga ljudutstrålningen under koincidensfrekvensen beror på utsläckning genom hydrodynamisk kortslutning mellan närliggande svängningsfält.

Maidanik (1962) har utförligt behandlat strålningsfaktorn för fria svängningar, även hos förstyvade plattor. Resultatet återges sammanfattningsvis av följande samband under förutsättning av efterklangsfält i homogena, ändliga, svagt dämpade, fritt upplagda plattor.

$$\sigma \approx \frac{\lambda_c^2}{S} g_1 + \frac{U \lambda_c}{S} g_2 \quad \text{för } f \ll f_c \quad (3.51)$$

$$\text{där } g_1 = \begin{cases} \frac{8(1-2\alpha^2)}{\pi^4 \alpha \sqrt{1-\alpha^2}} & \text{för } f < f_c/2 \\ 0 & \text{för } f > f_c/2 \end{cases}$$

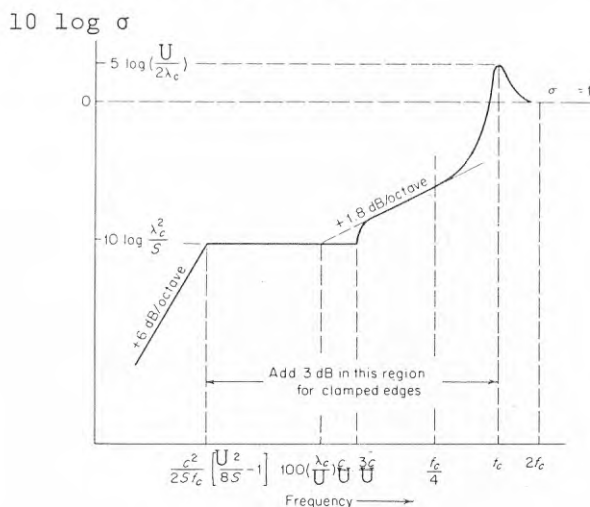
$$g_2 = \frac{1}{4\pi^2} \left[ \frac{(1-\alpha^2) \ln \left( \frac{1+\alpha}{1-\alpha} \right) + 2\alpha}{(1-\alpha^2)^{3/2}} \right]$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{f}{f_c}}$$

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1_x}{\lambda_c}} + \sqrt{\frac{1_y}{\lambda_c}} \quad \text{för } f = f_c \quad (3.52)$$

$$\sigma \approx \left( 1 - \frac{f_c}{f} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{för } f \gg f_c \quad (3.53)$$

där  $U = 2(l_x + l_y)$  är den oförstyvade plattans omkrets,  $S$  dess yta och  $\lambda_c = c_0/f_c$  våglängden vid koincidens. Frekvensberoendet åskådliggöres i följande figur, hämtad ur Beranek (1971):



Strålningsfaktorn  $\sigma$  för en fritt upplagd alt.  
inspänd platta med omkretsen  $U$  och ytan  $S$ .

Då en förstyvad platta kan ses som summan av ett antal oförstyvade subpaneler, inses att strålningsfaktorn vid och under koincidens ökar eftersom den sammanlagda randlängden  $U$  blir betydligt större än för en oförstyvad platta. Resonemanget förutsätter att halva böjvåglängden är betydligt mindre än avståndet mellan förstyvningarna. Om halva böjvåglängden däremot är större än avståndet mellan förstyvningarna kan plattan behandlas som isotrop i den mån förstyvningarna ej förhindrar den hydrodynamiska kortslutningen. Just vid första subpanelresonansen sker en kraftig utstrålning eftersom denna svängningsmod saknar utsläckande komplement. Se Einarsson (1976).

### 3.4.2 Strålningsegenskaper hos anisotropa bjälklag

Utöver vad som ovan relaterats gäller att för betraktelsen av det anisotropa bjälklaget inträder två gränsfrekvenser, en i böjstyvaste riktningen

$$f_{cx} = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M_s}{B_x}} \quad (3.54)$$

och en i böjsvagaste riktningen

$$f_{cy} = \frac{c_o^2}{2\pi} \sqrt{\frac{M_s}{B_y}} \quad (3.55)$$

Vid höga frekvenser observeras dessutom tryckplattans (subpanelens) koincidens enligt 3.50.

Ljunggren (1974) beskriver ljudutstrålningen i de olika frekvensområdena som därigenom uppstår, varvid även böjvåglängdens relation till avståndet mellan förstyvningarna måste beaktas. Nedan sammanfattas inverkan på utstrålad akustisk effekt.

#### A. Låga frekvenser ( $f \leq f_{cx}$ )

Med ledning av ekv. 3.46 och 3.47 kan den totalt utstrålade effekten beskrivas av

$$P_1 + P_2 = \frac{F_{eff}^2 \rho_o}{2\pi M_s^2 c_o} \left( 1 + \frac{M_s c_o^2 \sigma}{Z f \eta} \right) \quad (3.56)$$

I detta frekvensområde kan alla böjvåglängder förutsättas överstiga dubbla avståndet mellan förstyvningarna, varför plattan kan behandlas som en homogen, massekvivalent sådan. Strålningsfaktorn uppvisar enligt Maidanik (1962) ett komplicerat frekvensberoende som snarast kan ses som en överlagring av uttrycken 3.52 m.a.p.  $f_{cx}$  på dito m.a.p.  $f_{cy}$ .

För mycket stora bjälklag blir andra termen inom parentesen i 3.55 försumbar, varför närfältsutstrålningen dominerar. För ett bjälklag av normala dimensioner håller dock inte denna förenkling utan även efterklangsfältets utstrålning måste beaktas.

#### B. Medelhöga frekvenser ( $f_{cx} < f < f_{cy}$ )

Här avtar betydelsen av närfältet i förhållande till utstrålningen från efterklangsfältet.

Ett uttryck för strålningsfaktorn vid medelhöga frekvenser har härletts av Ljunggren (1974) under förutsättning av diffust fält och hög modtäthet.

$$\sigma = 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \phi \quad (3.57)$$

där

$$\phi = \arccos \sqrt{\frac{1 - \frac{c_o^2}{\omega} \sqrt{\frac{M_s}{B_y}}}{1 - \sqrt{\frac{B_x}{B_y}}}} \quad (3.58)$$

Detta värde insättes i uttrycket 3.47 för den från efterklangsfältet utstrålade akustiska effekten. Uttrycket förutsätter fortfarande att halva böjvåglängden överstiger avståndet mellan förstyvningarna. När detta inte är fallet börjar subpanelernas egen-svängningar inverka, varvid dessa kan behandlas som separata plattor med strålningsfaktorerna givna av 3.51-3.53 i förhållande till  $f_{cp}$ . Ytvikten  $M_s$  ersättes av subpanelernas ytvikt  $M_p$ . Särskilt bör första subpanelresonansen ge hög utstrålning om hydrodynamisk kortslutning ej äger rum vid någorlunda höga balkar.

Då intilliggande subpaneler svänger i motfas bör kortslutningseffekten å andra sidan till viss grad kunna uppstå och utstrålningen därigenom minska.

### C. Höga frekvenser ( $f > f_{cy}$ )

Ovanför koincidens är strålningsfaktorn för efterklangsfältet

$$\sigma \approx 1 \quad (3.59)$$

varför ljudutstrålningen är relativt stark.

### D. Vid koincidensfrekvenserna ( $f = f_{cx}, f_{cy}$ )

En förhöjd strålningsfaktor kan i motsats till homogena plattor ej förväntas för anisotropa plattor vid koincidens. Troligen inverkar också förstyvningarna hos exempelvis ett TT-bjälklag hindrande för koincidenseffekten. Samtidigt blir koincidensen riktningsberoende. Särskilt komplicerat blir fallet då halva böjvåglängden vid koincidens ligger i närheten av avståndet mellan förstyvningarna. Modellmätningar bör här kunna ge en viss information.

### Övriga strålningspåverkande faktorer

Hos ett ribbförstyvat bjälklag kan som tidigare nämnts förstyvningarna verka hindrande på den hydrodynamiska kortslutningseffekten under koincidens. Detta kan vid vissa frekvenser öka ljudutstrålningen. Å andra sidan kan balkkonfigurationen i viss mån "spräcka upp" en från koherenta svängningsmoder eljest samverkande utstrålning.

Om förstyvningarna upptar en relativt stor del av bjälklagsytan, reduceras subpanelernas effektiva strålade yta vilket sänker stegljudsnivån vid höga frekvenser.

Cederfeldt (1973) påvisar att djupa "fack" mellan höga balkförstyvningar kan ge upphov till kvartsvågsresonanser i riktning vinkelrätt mot bjälklagsplanet.

Stående vågor mellan balkarna, parallellt med bjälklagsplanet, bör också kunna inverka på ljudutstrålningen.

Höga balkar kan genom spegling bidra till förhöjt ljudtryck.

Hos ett hålbjälklag med planparallella ytor uppstår ej dessa effekter, ej heller hindras koincidenseffekten eller den hydrodynamiska kortslutningen under koincidens.

Däremot bör luftljudsresonanser kunna uppstå i ursparingarna med förhöjd stegljudsnivå som följd.

Sammanfattningsvis uppvisar anisotropa bjälklag en komplicerad bild av ljudutstrålningsförhållandena, särskilt i övergångsområdena, vilket framhäver behovet av experimentella studier.

#### 3.4.3 Stegljudsnivån i rummet

Den till rummet inmatade akustiska effekten  $P = P_1 + P_2$  ger upphov till ljudtrycket  $p$  där

$$|p|^2 = \rho_0 c_0 \left( \frac{P_1 Q_0}{4\pi r^2} + \frac{n(P_1 + P_2)}{R} \right) \quad (3.60)$$

Inom parentesen anger första termen förhållandet i det akustiska närfältet till exciteringspunkten och andra termen förhållandet i det fullständigt diffusa efterklangsfältet, varvid diffusitetsfaktorn  $n=4$ .



I det följande förutsätter vi att rumskonstanten

$$R = \frac{A_M}{1-\bar{\alpha}} \quad (3.61)$$

är så låg att mikrofonen alltid kan befinna sig i det diffusa fältet, varför närfältstermen försummas. I så fall är också medelabsorptionskoefficienten  $\bar{\alpha}$  så låg att rumskonstanten kan approximeras med rumsabsorptionen  $A_M$ . Vidare bör rummet vara så stort att minst fem rumsmode faller inom det betraktade tersbandet. Den erhållna ljudtrycksnivån kan då med ledning av ekv. 3.60 skrivas (rumstemperatur)

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{|p|}{p_0} = 10 \cdot \log (P_1 + P_2) + 125,8 - 10 \cdot \log A_M \quad \text{dB} \quad (3.62)$$

Vid höga frekvenser, speciellt aktuellt vid modellmätning, måste även luftens absorption beaktas. Denna inkluderas automatiskt i det fall  $A_M$  bestäms genom efterklangstidsmätning.

Ekv. 3.55 leder oss vidare till uttrycket

$$L_p = 20 \cdot \log F_{\text{eff}} - 20 \cdot \log M_s + 10 \cdot \log \left( 1 + \frac{M_s c_o^2 \sigma}{Z f \eta} \right) + 93,4 - 10 \cdot \log A_M \quad \text{dB} \quad (3.63)$$

där ettan inom parentesen avser närfältsutstrålningen, vilken kan bortses från vid frekvenser över  $f_{cx}$ .

Med  $F_{\text{eff}}$  enligt 3.12,  $Z$  enligt kap. 3.3 och  $\sigma$  enligt resonemanget ovan erhålles följande generella uttryck för stegljudsnivån i tersband om rumsabsorptionen normeras till  $10 \text{ m}^2$  Sabine och effekten av den lokala deformationen vid höga frekvenser utelämnas.



$$L_{10} = 10 \cdot \log \frac{m_h^2}{T_r} + 10 \cdot \log f - 20 \cdot \log M_s + \\ + 10 \cdot \log \left( 1 + \frac{M_s^2 c_{0\sigma}^2}{Z f \eta} \right) + 93.0 \quad \text{dB} \quad (3.64)$$

Den skenbara förlustfaktorn  $\eta$  är vanligen frekvensberoende, se figur 3 och ekvation 3.18.

För TT- och kupolbjälklag ersättes vid högre frekvenser, där  $\lambda_{By} \gg d$ ,  $M_s$  med  $M_p$  och  $Z$  med  $Z_p = 8 \cdot \sqrt{M_p B_p}$ .

Om uttrycket datorbehandlas kan stegljudsnivån relativt lätt approximeras i de olika frekvensområdena som avgränsas av koincidensfrekvenserna. Så har skett som underlag för det redovisade arbetet.

Giltigheten begränsas vid alltför litet antal svängningsmoder per tersband. För  $\sigma$  gäller omkrets och yta vid låga frekvenser hela bjälklaget, vid höga frekvenser (TT- och kupolbjälklag) totala antalet subpaneler, varvid dessa förutsättes svänga inkoherent och med lika nivå. Detta torde vara en sanning med modifikation med tanke på förstyvningarnas filtrerande effekt på vibrationsöverföringen från den exciterade subpanelen till de angränsande, se redogörelsen kring ekv. 3.17.

Om uttrycket jämföres med vibrationshastighetsnivån i 3.16, inses att för utstrålningen från efterklangsfältet gäller

$$L_{10} = L_v + 10 \cdot \log S + 10 \cdot \log \sigma - 3.8 \quad \text{dB} \quad (3.68)$$

För en rumsabsorption avvikande från  $10 \text{ m}^2$  Sabine erhålles i stället ljudtrycksnivån i tersband som

$$L_p = L_{10} - 10 \cdot \log \cdot \frac{A_M}{10} = L_v + 10 \cdot \log S + 10 \cdot \log \sigma -$$
$$- 10 \cdot \log A_M + 6.2 \text{ dB} \quad (3.69)$$

S betecknar den totala bjälklagsytan.



Bjälklagen kan indelas i två huvudgrupper: platsgjutna resp. prefabricerade (element). Platsgjutna bjälklag utföres med sparformar (färdiga formsystem eller tillfälligt monterade formkonstruktioner) alternativt kvar sittande formar.

Prefabricerade bjälklagselement förekommer såväl slakarmerade som förspända. Armeringsmetoden påverkar i viss mån de dynamiska egenskaperna och därmed stegljudsnivån. Den sprickbildning som alltid uppstår med tiden ger en lägre böjstyvhets hos slakarmerad än hos förspänd betong, eftersom förspänningen håller ihop materialet mera. Särskilt erhålles vid starkt underarmerad betong ett lägre tröghetsmoment p.g.a. uppsprickningen. Hos förspänd betong ökar E-modulen 5 á 10% samtidigt som den geometriska böjstyvhetsberäkningen bibehåller relevans.

Dessa skillnader är dock med tanke på stegljudsnivån obetydliga. Störst inverkan har armeringsmetoden med avseende på de inre förlusterna, vilka varierar med en faktor 2 á 3. Därvid har förspänd betong de lägsta förlusterna eftersom friktionsrörelserna i sprickorna är små. Detta kan ge utslag vid höga frekvenser med några dB förhöjning av stegljudsnivån. Vid låga och medelhöga frekvenser dominerar randförlusterna över de inre förlusterna.

Med tanke på sprickutbildningen är det vid stegljudsmätning väsentligt att ange åldern hos bjälklaget.

Volymvikten för betong håller sig i närheten av  $2400 \text{ kg/m}^3$ , i stort sett oberoende av betongkvalitet (K 250 - K 600). Armeringen uppgår vanligen till  $5\text{-}10 \text{ kg/m}^2$ , ett försumbart tillskott i stegljudssammanhang.

Typiskt värde för dynamisk elasticitetsmodul  $2,6 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>. Poissons tal ca 0,2.

Nedan ges en översikt över förekommande bjälklags-typer och exempel på leverantörer (1977).

#### 4.1 Planparallella bjälklag

Homogen, planparallellt gjuten betong i tjocklekarna 120-180 mm. Överbetong pågjutes och stålslipas, 30-50 mm eller mera. Korta spännvidder.

##### Exempel på formar för platsgjutning

Kvarsittande formar: ABM filigranbjälklag  
EW-rutarmerade byggelement  
(träreglar)  
Omnia-planbjälklag  
(Fredrik Holmqvist)

Sparformar: BM Steidle formsystem  
Bygging formsystem (trä el. stål)  
Formplywood  
Gell System  
Hünnebeck Tunnelform  
P-form

##### Exempel på prefabricerade element

A-betong AB  
Erge-bjälklaget (balkar o. plattor)  
Falkenbergs Betongindustri AB  
Göteborgs Stads Bostads AB  
Karlssons Cementgjuteri, Kvikksund  
AB Kristianstads Cementgjuteri  
Närkes Spännbetong AB  
SCG Byggelement  
AB Strängbetong  
Strömsunds Cementvarufabrik AB  
Systembetong AB (Skarne-system)  
Träullit AB

#### 4.2 TT-bjälklag (ribbjälklag)

Principiellt utförande enligt kap. 3.3.1.

Måttexempel: Tryckplatta	50-100 mm	} $h_p$
Överbetong	60-100 mm eller mera	
Balkhöjd $h_b$	120-650 mm	
Balkbredd $b_1$	113-300 mm	
" $b_2$	70-230 mm	
c/c balk s	600,750,1200,1500 mm eller valfritt 200-1200 mm.	

#### Exempel på formar för platsgjutning

Kvarsittande formar: ABM RP 72

Essö typ SW

Kaiserbjälklaget

Omnia-ribbplattbjälklag

Sparformar:

ABM Sparform

AJAB formsystem (A-betong)

Gell system

#### Exempel på prefabricerade bjälklagselement, TT-kassetter

A-betong AB (TT,TK)

AB Betong-Sander (Besaco, TT-kassett)

Erge-bjälklaget

AB Kristianstads Cementgjuteri (TTf)

AB Nordbetong (TT)

Närkes Spännbetong AB (TTf)

SCG Byggelement (TTf)

AB Strängbetong (TT)

Strömsunds Cementvarufabrik AB

Till denna bjälklagstyp kan ur stegljudssynpunkt också räknas U-kassetter med kassettenen nedåt, däremot ej U-profilerade kassetter där hålrum uppstår genom överbyggnad på de uppåtvända benen. Sådana bjälklagselement (ex. Nilcon, AH-bjälklaget, EW-bjälklaget m.fl.) behandlas ej här.

#### 4.3 Kupolbjälklag

Principiellt utförande enligt kap. 3.3.2.

Måttexempel: Tryckplatta	80-100 mm	} $h_p$
Överbetong	30-80 mm	
Balkhöjd $h_b$	200-500 mm	
Balkbredd $b_1$	210-250 mm	
" $b_2$	150 mm	
c/c balk $s_x, s_y$	1200 mm	

#### Exempel på formar för platsgjutning:

Sparformar: abm sparform  
 AJAB (A-betong)  
 Gell System

#### 4.4 Hålbjälklag

Principiellt utförande enligt kap. 3.3.3.

Måttexempel: Tjocklek $h_h$	185-265 mm + överbetong 30-50 mm
Håldiameter $D$	108-185 mm
c/c hål $s_h$	139-226 mm

#### Exempel på prefabricerade hålbjälklagselement:

A-betong AB (HD-elementet, BE-elementet)  
 AB Nordbetong (HD-plattan)  
 SCG byggelement  
 AB Strängbetong (SH-plattan)

#### 4.5 Övriga bjälklag

Ett antal prefabricerade bjälklagselement av olika typer som avviker från de ovan presenterade förekommer i marknaden. Dessa har ej tagits upp till behandling i detta arbete. Behandlingen ur stegljudssynpunkt kräver särskild omtanke, speciellt med hänsyn till övergolvkonstruktionerna.



Exempel på övriga prefabricerade bjälklagselement:

AH-bjälklaget

EW-bjälklaget (Magra AB)

AB Gottåsa Cementgjuteri (U-kassetter)

Nilcon- (f.d. IB-) elementet

AB Nordbetong (U-kassetter)

AB Strängbetong (FF-elementet)

Strömsunds Cementvarufabrik AB (U-kassetter)



Som framgått av den teoretiska behandlingen i kapitel 3 kan stegljudsnivån ej alltid beräkningsmässigt bestämmas tillräckligt väl. Detta gäller särskilt övergångsområdena mellan olika generaliserande betraktelsesätt för de anisotropa bjälklagen. Hos TT- och kupolbjälklag kan dessutom balkarna inverka på ljudutstrålningen i obestämbar grad. För att erhålla en mera detaljerad uppfattning om hur de geometriska parametrarna påverkar stegljudsnivån har därför en serie modellmätningar genomförts på bjälklagsmodeller i gips.

Samtliga modeller har gjutits i långsamhårdande gips (Hebolit) för god hållfasthet och hård yta.

Dynamisk E-modul och inre förlustfaktor har för torr gips bestämts med komplex-modul-apparat till

$$E = 0,77 - 1,1 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \text{ resp. } \eta = 0,9\%$$

vid ca 2000 Hz. Specifika vikten noterades till

$$\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$$

Förlustfaktorernas frekvensberoende hos ett fritt upplagt planparallellt bjälklag framgår av figur 3. Mätningen har utförts enligt efterklangsmetoden och inkluderar såväl randförluster som inre förluster, de förstnämnda dominerande vid låga frekvenser. Vid höga frekvenser kan de inre förlusterna avläsas till ca 0,4%. I diagrammet har också inlagts förlustfaktorer bestämda ur resonansbandbredden i en punktadmittansmätning.

### 5.1 Typer och dimensioner

Följande bjälklagsmodeller i gips har använts i försöken:

Planparallella bjälklag:

Beteckningar		P1	P2	
Tjocklek	$h_p$	32	40	mm
Längd	a	700	800	mm
Bredd	b	700	1000	mm

TT-bjälklag:

Beteckningar		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	
Plattans tjocklek	$h_p$	24	22	24	40	40	40	40	mm
Balkhöjd	$h_b$	40	40	40	40	40	40	40	mm
Balkbredd upptill	$b_1$	20	20	20	20	20	20	20	mm
Balkbredd nertill	$b_2$	20	20	20	20	20	20	20	mm
c/c balkar	s	120	180	350	120	180	240	350	mm
Längd längs balk	a	700	700	700	700	700	700	700	mm
Bredd tvärs balk	b	700	700	700	700	700	700	700	mm

Beteckningar		T8	T9	T10	
Plattans tjocklek	$h_p$	34	20	20	mm
Balkhöjd	$h_b$	56	100	60	mm
Balkbredd upptill	$b_1$	50	30	30	mm
Balkbredd nertill	$b_2$	30	30	30	mm
c/c balkar	s	188	120	120	mm
Längd längs balk	a	800	800	800	mm
Bredd tvärs balk	b	1000	1000	1000	mm

Hålbjälklag:

Beteckningar		H1	H2	H3	H4	H5	H6	
Tjocklek	$h_h$	40	40	40	40	40	56	mm
Håldiameter	D	19	19	19	28	28	23	mm
c/c hål	$s_h$	25	35	50	35	80	37	mm
Längd längs hål	a	700	700	700	700	700	800	mm
Bredd tvärs hål	b	700	700	700	700	700	1000	mm

Utanför detta projekt har modellmätningar dessutom utförts på ribb- och kupolbjälklag där modellerna tillverkats av plexiglas resp. trä.

## 5.2 Beräknade stegljudsegenskaper

Ett datorprogram har framtagits där det teoretiska underlaget i kapitel 3 i görlligaste mån utnyttjas för beräkning av stegljudsnivåer såväl i fullskala som i modell. Programmet är skrivet för Hewlett-Packard bordsdator 9830A.

Följande bjälklagstyper kan behandlas:

1. Planparallella bjälklag
2. Hålbjälklag
3. TT-(ribb-)bjälklag
4. Kupolbjälklag

Programmet beräknar bjälklagsdata enligt följande:

Ytvikt (ekvivalent resp. för subpanel)  
 Böjstyvhet (längs resp. tvärs förstyvningar samt för subpanel)  
 Egenresonansfrekvenser (för fritt upplagt resp. inspönt bjälklag eller subpanel vid godtycklig inspänningsgrad)  
 Koincidensfrekvens (längs resp. tvärs förstyvningar samt för subpanel)  
 Skenbar förlustfaktor (med ledning av inmatade värden vid en frekvens)  
 Strålningsdämpning (i olika frekvensområden)  
 Hammarens kraftspektrum (i fullskala eller modell)  
 Inverkan av lokal deformation under hammaren  
 Punktimpedans (i olika frekvensområden)  
 Vibrationshastighetsnivå (i bjälklagets efterklangsfält)  
 Förhållande mellan utstrålad ljudeffekt från närfält resp. efterklangsfält  
 Stegljudsnivå  $L_{10}$  eller  $L_{0,63}$  i tersband 25-20000 Hz.

Erforderliga ingångsdata:

Total längd och bredd samt övriga geometriska dimensioner hos bjälklaget  
 E-modul och specifik vikt hos materialet  
 Inspänningsgrad hos bjälklag resp. subpanel  
 Brytfrekvens p.g.a. lokal kontaktdeformation  
 Inre förlustfaktor  
 Randförlustfaktor vid 100 Hz

Inspänningsgraden används endast för beräkning av egenresonansfrekvenserna och är naturligtvis svår att förutsäga. I detta arbete har valts faktorn 3,1 för subpanelerna hos bjälklagen T1-T8 samt faktorn 1,6 för bjälklagen T9 och T10. För hela bjälklaget har inspänningsgraden antagits till  $\pi/2$  (fritt upplagt).

För randförlusternas frekvensberoende har använts uttrycket

$$\eta_r = \eta_{100} \cdot \sqrt{\frac{100}{f}} \quad (5.1)$$

Inre (termiska) förlustfaktorn antages konstant och skenbara förlustfaktorn bildas ur

$$\eta_s = \eta_r + \eta_i \quad (5.2)$$

Vid beräkningarna har använts  $\eta_i = 0,4\%$ ,  $\eta_{100} = 10\%$ ,  
 $E = 7,7 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$

Förlustfaktorn har stor betydelse för stegljudsnivån. För beräkningsmetodiken vore det därför av intresse att utöka kunskaperna om dess storlek och frekvensberoende i färdig byggnad, exempelvis genom mätning av skenbara förlustfaktorn med efterklangsmetoden eller resonansmetoden i ett antal fall.

Med datorprogrammet har förväntade stegljudsnivåer beräknats för de aktuella gipsmodellerna. Resultatet visas som streckade kurvor i figurerna 8-25.

Skalan för modellmätningarna har valts till 1:4. Detta möjliggör frekvenstransponering i jämn multipel av 2. Skalan bestämmer måtten för modellhammarapparaten, provöppningen och mätrummetts minimidimensioner.

### 6.1 Hammarapparat

En modell i skala 1:4 av den i ISO R140 standardiserade hammarapparaten har byggts för försöken. Som förebild har använts Brüel & Kjaers typ 3204. Se figur 4. Följande mått är helt skalenliga:

Antal hammare	5 st.
c/c-avstånd mellan hammare	25 mm
Diameter hos hammarhuvud	7,5 mm
Krökningsradie hos hammarhuvud	125 mm (sfärisk kontaktyta)
Fallhöjd	10 mm
Repetitionsfrekvens	40 Hz

För att erhålla skalenliga vibrationsamplituder hos modellbjälklaget kan beräkningsmässigt visas att för samma byggmaterial krävs  $4^3$  gånger lägre impuls hos hammaren. Detta ger vid 10 mm fallhöjd hammarmassan 15,6 gram ur relationerna

$$m \sqrt[4]{2gh} = \frac{m \sqrt[4]{2gh}}{4^3} = \frac{0,5 \cdot \sqrt[4]{2 \cdot g \cdot 0,04}}{4^3} \quad (6.1)$$

Denna massa valdes av tillverkningstekniska skäl trots att gips användes i stället för betong i modellerna vilket egentligen skulle kräva hammarmassan 5,6 gram.

För att förhindra studs hos hammaren roterar upphämtningsaxeln med 8 varv per sekund mot 1 hos förebilden, men är i stället försedd med endast en lyftare i stället för två. Lyftaren består av ett miniatyrkullager för lägsta friktion mot den gummiklädda lyftkragen hos hammaren.



Apparaten drivs av en utväxlad synkronmotor.

Varje hammare har teflonbussning och hål för tryckutjämning mot den vertikala styrepinnen i centrum av hammaren.

Då hammaren skjuts iväg ett stycke uppåt av lyftaren har praktiska fallhöjden justerats till 10 mm med hjälp av stödbenen.

Hammarapparatus kraftspektrum har uppmätts i tersband med realtidsanalysator General Radio typ 1921. En hammare fick därvid falla mot en piezoelektrisk kraftgivare Brüel & Kjaer typ 8200, monterad på en 5 kg ståklump. Resultatet, figur 5, visar en något högre kraft än vad som förväntas med ledning av uttrycket

$$F_{rms}^2 = 2 \cdot 0,23 (m\sqrt{2gh})^2 \cdot f \cdot f_r \quad (6.2)$$

Detta beror troligen på att luften inuti hammaren ej evakueras tillräckligt snabbt vid lyftet utan komprimeras och fungerar som en fjäder. I de teoretiskt framräknade stegljudsnivåerna har tagits hänsyn till detta genom att modellhammarapparatus kraftspektrum höjts i motsvarande grad (7 dB).

## 6.2 Modellmätrum

Mätrummet är uppbyggt i 10 cm lättbetong med mått enligt figur 6. Provöppningens yta är  $0,63 \text{ m}^2$  och rummets volym  $1,59 \text{ m}^3$ . I fullskala motsvarar detta  $10 \text{ m}^2$  resp.  $100 \text{ m}^3$ , vilket möter kraven i ISO R140.

Diagonalt genom mätrummet ligger en stång på vilken ett mikrofonfäste löper med hjälp av en lina med motvikter. Mikrofonen förflyttas mellan sina ändlägen på 32 sekunder, vilket motsvarar den längsta integrationstiden hos mätutrustningen. Ändlägena befinner sig 30 cm från närmaste vägg.

Rumsvolymen ger minst 5 moder per tersband fr.o.m. 400 Hz, vilket således kan betecknas som undre gränsfrekvens för mätningar i modellmättrummet.

Modellmättrummet är invändigt lackerat, vilket ger en efterklangstid enligt figur 7. Efterklangstiden motsvarar ca  $0,6 \text{ m}^2$  rumsabsorption, vilket i fullskala nära sammanfaller med ISO-rekommenderade  $10 \text{ m}^2$ .

Luftabsorptionen inverkar på efterklangstiden vid frekvenser över ca 6000 Hz. Den ingår i de uppmätta absorptionsvärdena, vilka använts för korrektion av stegljudsnivåerna mot referensvärdet  $0,63 \text{ m}^2$  Sabine. De på detta sätt normerade stegljudsnivåerna benämnes  $L_{0,63}$  och skiljer sig från fullskalans  $L_{10}$  med  $10 \cdot \log 4^2$ , d.v.s. 12 dB.

Flanktransmissionen i mättrumets väggar spärras av en skumplastlist mellan tak och sidoväggar. Dämpningen är för frekvenser över 315 Hz 20 dB eller bättre. Gipsmodellerna har placerats fritt upplagda över mätöppningen, direkt på mättrumets tak. Knutpunktsdämpningen mellan gipsmodell och lättbetongtak har uppmätts till minst 6 dB vid frekvenser över 800 Hz, typiskt 10 dB. Vid frekvenser därunder kan en energiöverföring påräknas, vilket tar sig uttryck i en förhöjd skenbar förlustfaktor hos modellbjälklaget. Eftersom strålningsfaktorn vid dessa frekvenser är låg för mättrumstaket, utstrålas ej den flanktransmitterade energin och resultatet blir att den uppmätta stegljudsnivån understiger den som teoretiskt beräknas vid låga frekvenser. Kontroll av flanktransmissionen har skett genom vibrationsmätningar då hammarapparaten var placerad på ett planparallellt gipsbjälklag.

Bakgrundsnivån med mikrofon i rörelse har uppmätts till lägre än 40 dB i tersband inom det aktuella frekvensområdet. Detta ger betryggande marginal till de stegljudsnivåer som erhålles.

Diffusiteten i mättrummet har kontrollerats genom placering av mikrofonen i olika lägen på dess bana vid hammarapparatsexcitering mitt på ett planparallellt gipsbjälklag. Största skillnaden i tersbandsnivå mellan olika placeringar uppgick därvid till 9 dB i frekvensområdet 400-20000 Hz, typisk spridning ca 6 dB.

Ekvivalentnivån under ett svep med rörlig mikrofon har konstaterats motsvara medelvärdet av 5 stillastående positioner inom 2 dB. Rörlig mikrofon bedömes ge den bästa reproducerbarheten.

### 6.3 Mätinstrument

Följande instrument har använts vid stegljudsmätningarna på modellbjälklagen:

Mikrofon 1/2 tum Brüel & Kjaer 4134  
 Katodföljare Brüel & Kjaer 2613  
 Strömförsörjningsenhet Brüel & Kjaer 2801  
 Bandspelare Kudelski Nagra IV SJ  
 Bandspelare Studer B62  
 Mätförstärkare Brüel & Kjaer 2608  
 Realtidsanalysator General Radio 1921  
 Bordsdator Hewlett-Packard 9830A  
 Printer Hewlett-Packard 9866A

Vid vibrationsmätningarna har kompletterats med:

Accelerometer Brüel & Kjaer 4344

Admittansmätningar har utförts med:

Impedansmät huvud Brüel & Kjaer 8001  
 Vibrator Goodman V47  
 Förstärkare Audex TR120  
 Tongenerator Brüel & Kjaer 1014  
 Kraftgivare Brüel & Kjaer 8200  
 Accelerometer Brüel & Kjaer 4344

Laddningsförstärkare Brüel & Kjaer 2628  
Accelerometerförstärkare Brüel & Kjaer 2625  
Mätförstärkare Brüel & Kjaer 2607  
Precisionsljudnivåmätare Brüel & Kjaer 2203  
Integrator Brüel & Kjaer ZR0020  
Bandpassfilter Krohn-Hite 3700  
Nivåskrivare Brüel & Kjaer 2305



### 7.1 Stegljudsnivåmätningar

Modellhammarapparaten har placerats på gipsbjälklaget i de fem positioner som motsvarar svensk standard SIS 025252. Mikrofonen har löpt sin rumsdiagonala bana och ljudtrycket har spelats in på band för att sedan analyseras under 32 sekunder per position med realtidsanalysatorn i 30 parallella tersband 25-20000 Hz. Området 400-12500 Hz har utnyttjats i redovisningen.

Efterklangstiden,  $T$ , i detta frekvensområde har bestämts dels genom högtalarutsändning av brus, dels genom avbruten hammarapparatsexcitering. De båda metoderna har befunnits ge tillräckligt överensstämmande resultat.

De normerade stegljudsnivåerna har beräknats enligt

$$L_{0,63} = L_M + 10 \cdot \log \frac{A_M}{0,63} \quad (7.1)$$

där

$$A_M = 0,161 \cdot \frac{V}{T} \quad (7.2)$$

$V$  står för mätrumsvolymen,  $L_M$  för uppmätt tersbandsnivå,  $A_M$  betecknar mätrumets absorptionsyta i  $m^2$  Sabine.

### 7.2 Vibrationsmätningar

Vibrationsmätningar har företagits på några av bjälklagen, dels för att få en uppfattning om vibrationernas utbredning i bjälklaget, dels för att bestämma strålningsfaktorn. Mätningarna har skett under hammarapparatsexcitering genom att en lätt accelerometer fästs med vax på bjälklagets undersida. Analys av de bandinspelade vibrationerna och medelvärdesbildning av flera mätpunkter

har skett med realtidsanalysator och bordsdator. Vibrationshastighetsnivån har valts som mått eftersom denna närmast står i proportion till ljudutstrålningen.

### 7.3 Admittansmätningar

Admittansen  $v/F$ , d.v.s. inversen av den mekaniska impedansen, har uppmätts dels som punktadmittans (i exciteringspunkten), dels som överföringsadmittanser mellan exciteringspunkten och olika punkter på modellbjälklaget. Admittansen har uppmätts som förhållandet mellan vibrationshastighetens och exciteringskraftens effektivvärden genom att en servoslinga (tongeneratorns kompressor) hållit kraften konstant och vibrationshastigheten under ett frekvenssvep registrerats på nivåskrivare.

Avsikten med admittansmätningarna har varit att dels få en bild av plattresonansernas fördelning, dels åskådliggöra effekten av olika bjälklagsuppläggningar.



8.1 Stegljudsnivåer

Uppmätta stegljudsnivåer,  $L_{0,63}$ , redovisas i figurerna 8-25 för följande gipsmodeller:

Fig. 8-9	Planparallella bjälklag P1-P2	
Fig. 10-19	TT-bjälklag	T1-T10
Fig. 20-25	Hålbjälklag	H1-H6

Parallellt redovisas beräknade stegljudsdata.  
Resultatet kommenteras i kapitel 9.

8.2 Vibrationsnivåer

Vibrationsmätningarna utfördes på planparallella bjälklaget P2 och de två TT-bjälklagen T8 och T9.

Utbredningsdämpningen åskådliggöres i figurerna 26-28 som funktion av avståndet från hammarapparatens exciteringsställe. Resultatet påverkas av att avståndet mellan mätpunkterna ofta är av samma storlek som eller kortare än halva böjvåglängden.

Som väntat uppvisar det planparallella bjälklaget i stort sett ingen utbredningsdämpning, vilket tyder på ett homogent efterklangsfält i plattan med likformig ljudutstrålning från hela ytan.

TT-bjälklagen T8 och T9 uppvisar en något större utbredningsdämpning till följd av balkarna, i synnerhet för de högsta frekvenserna. Detta får till följd att den exciterade subpanelen vid dessa frekvenser dominerar i ljudutstrålningen. Detta syns tydligt i figur 2, som gäller T9. Förhållandet kompenseras dock i stegljudsnivån av att sammanlagda ytan för de övriga subpanelerna är större. Hos dessa märks en utplaning av nivåerna mot

ett efterklangsfält, om än ej lika homogent som för det planparallella bjälklaget. Hos T8 förefaller frekvenserna över subpanelresonans dämpas kraftigare än hos T9, troligen beroende på de bredare balkarna.

Strålningsdämpningen framgår av skillnaderna mellan vibrationshastighetsnivåernas medelvärden och de uppmätta stegljudsnivåerna  $L_{0,63}$ . Se figurerna 29-31, där strålningsdämpningen beräknats med hjälp av ekvation 3.68 och förhållandet

$$L_{0,63} = L_{10} + 10 \cdot \log \frac{10}{0,63} \quad (8.1)$$

Viket ger strålningsdämpningen som

$$D = -10 \cdot \log \sigma = L_v - L_{0,63} + 6,2 \text{ dB} \quad (8.2)$$

Överensstämmelsen med den teoretiskt beräknade strålningsdämpningen är svag. I praktiken erhålles i genomsnitt en större dämpning, vilket är värt att notera, särskilt för TT-bjälklagen.

Balkvibrationerna redovisas för TT-bjälklagen T8 och T9 i figur 32 resp. 33. Jämförelserna med medelvärdet av subpanelvibrationerna visar att vid frekvenser under subpanelresonans deltar balkarna i bjälklagets svängningar i samma grad som subpanelerna. I detta område betecknas bjälklaget som ortotropt. Över första subpanelresonans svänger subpanelerna friare i förhållande till balkarna. Detta syns tydligt hos T9, som har en relativt vek tryckplatta i förhållande till de höga och styva balkarna, men är mindre uttalat hos T8 där plattan är tjock och fastare förbunden med balkarna.

Inverkan av olika hammarapparatpositioner på TT-bjälklaget T9 framgår av figur 1. En markant dämpning av högfrekvensen erhålles endast om hammarapparaten uteslutande bearbetar en balk, där högfrekvensimpedansen är större än på subpanelen.

Brytfrekvensen  $f_0$  orsakad av lokal deformation i exciteringspunkten framgår tydligt ur vibrationsmätningarna. Vid denna frekvens har vibrationsnivån sjunkit 5,4 dB i tersband för att sedan avta ytterligare mot högre frekvenser. Brytfrekvensen beror av kontaktytans egenskaper och har i detta fall bestämts till ca 12500 Hz. Gipsytan är därmed mjukare än betong om hänsyn tas till skalförhållandena. En viss reducering av nivåerna i de högsta tersbanden erhålles således i modellförsöken. Detta sker ej i samma grad för normala fullskaleråbjälklag i betong, där brytfrekvensen oftast ligger vid ca 5000 Hz, se figur 66.

### 8.3 Admittanser

Punktadmittansen  $v/F$  med svept sinusexcitering mitt på det planparallella gipsbjälklaget P2 framgår av figur 34-36 för tre olika upplagssätt. Vid stegljudsmätningarna har bjälklagen legat fritt upplagda direkt på mättrumets tak.

Skumplastuppläggningsen, som ej motsvarar något realistiskt fall, ger hög reflexion vid randen varför vibrationsenergin stannar i plattan och bygger upp ett fält av plattresonanser som ger hög stegljudsnivå. Förlustfaktorn blir låg och domineras av de inre (termiska) förlusterna.

Vid belastad rand, som kan anses motsvara fullskaleförhållanden i tunga byggnadskonstruktioner, bortledes energin via randen. Förlustfaktorn (skenbara) blir högre och stegljudsnivån därmed lägre. Samtidigt ökar risken för inverkan av flanktransmission.

Fritt upplagt bjälklag (direkt på mättrumstaket) kan anses motsvara förhållandena vid lätta byggnadskonstruktioner och utgör ett mellanting.

Då exciteringskraften varit konstant i mätningarna står admittansen i proportion till vibrationshastigheten, som i sin tur bestämmer stegljudsnivån. Diagrammen antyder

därför att en skillnad på 10 dB i stegljudsnivån vid låga frekvenser lätt kan uppstå mellan olika byggnads-sätt för samma bjälklag.

Som synes ligger bjälklagsresonanserna ganska glest i det aktuella lågfrekvensområdet 400-2000 Hz. Då spektrallinjerna i hammarapparatens kraftspektrum ligger med 40 Hz lucka, inses att stora variationer lätt kan uppstå i stegljudsnivån vid dessa frekvenser. Resonanstätheten ökar med bjälklagets storlek, varför ett större provbjälklag ur denna synvinkel vore att föredra.

Figurerna 37 och 38 visar överföringsadmittansen mellan exciteringspunkten i mitten av bjälklaget och vardera randen. Mätningarna gäller fritt upplagt bjälklag på mättrumstaket. En jämförelse med figur 36 visar att ingen nämnvärd dämpning erhålles mellan dessa punkter, utan randen svänger med samma vibrationshastighet som exciteringspunkten.

Figur 39 ger en uppfattning om transmissionen till mät-rumstaket. För frekvenser över 800 Hz erhålles god dämpning, medan flanktransmissionen därunder är påtaglig. Se även avsnitt 6.2.

Modellmätresultaten jämföres i figurerna 8-25 med teoretiskt beräknade stegljudsnivåer.

För frekvenser över ca 2000 Hz är överensstämmelsen i allmänhet god. Mot lägre frekvenser understiger de uppmätta nivåerna genomgående de beräknade. Figur 40 visar för bjälklaget P2 beräknade och uppmätta vibrationshastighetsnivåer. Figurerna 41 och 42 ger samma värden för bjälklagen T8 resp. T9. Avvikelserna vid låga frekvenser uppstår tydligen redan vid exciteringen av bjälklaget. Att förklaringen ej helt står att finna i strålningsdämpningen framgår av figurerna 29-31.

Hammarapparatus exciteringskraft uppvisar vidare ett kontinuerligt förlopp enligt figur 5 utan avmattning vid låga frekvenser. Hammarapparaten ger något högre nivå än beräknat, vilket återspeglas i vibrationshastighetsnivåerna. Detta kompenseras enligt figur 29-31 av en högre strålningsdämpning än vad teorierna anger; för TT-bjälklag markant vid frekvenser högre än första luftljudsresonans mellan balkarna. Förklaringen till lågfrekvensavvikelserna ligger troligen i den glesa modtättheten vid dessa frekvenser.

Figur 36 åskådliggör det senare. Notera att hammarapparatus spektralinjer ej alltid ligger i närheten av egenfrekvens hos bjälklaget (P2), varför stegljudsnivån vid de lägsta frekvenserna av denna anledning kan bli för låg. För det fast inspända bjälklaget torde avvikelserna bli mindre, se figur 35.

Den teoretiska behandlingen utgår från energibetraktelser som förutsätter hög modtätthet, minst 5 per frekvensband. Denna täthet uppnås enligt ekvation 3.29 först vid följande frekvenser.

Bjälklag

Minst 5 moder  
per tersband fr.o.m.

P1	2000 Hz
P2	1600 Hz
T1	2500 Hz
T2	2500 Hz
T3	2000 Hz
T4	3150 Hz
T5	3150 Hz
T6	3150 Hz
T7	3150 Hz
T8	2500 Hz
T9	4000 Hz
T10	2500 Hz
H1	3150 Hz
H2	2500 Hz
H3	2500 Hz
H4	3150 Hz
H5	2500 Hz
H6	2500 Hz

I mätresultaten finns en tendens att avvikelserna börjar inträda under denna gränshfrekvens. För en relevant jämförelse med teorin borde därför bjälklagsmodellerna varit större, med högre modtäthet vid samma frekvens som följd. För bjälklaget T8, exempelvis, erhålles tillräcklig modtäthet i lägsta tersbandet 400 Hz vid bjälklagsytan  $5 \text{ m}^2$ . Denna yta är vanskelig att åstadkomma i modell. Lägst ca 1000 Hz kan uppnås med den aktuella försöksutrustningen om hela takytan utnyttjas.

Alternativt borde modellbjälklagen mätas fast inspända, med högre randförluster och därmed bredare egenresonansstoppar som följd, varvid risken för att hammar-kraftens spektrallinjer "missar" egenresonanserna borde vara mindre.



Modellförsöken bedömes representativa för fritt upplagda fullskalebjälklag i storleksordningen 8-13 m<sup>2</sup>. Lågfrekvensområdet besitter dock ganska stor osäkerhet i bestämningen av stegljudsnivåerna av ovannämnda skäl.

Förlustfaktorn har som tidigare nämnts stor betydelse. Begagnade värden för TT-bjälklagen T8-T10 jämföres i figur 43 med ekvation 3.18. Observera att ekv. 3.18 enbart gäller den exciterade subpanelen medan den streckade linjen enligt ekv. 5.1 och 5.2 avses beskriva hela bjälklaget. Resultatet i figur 2 förefaller vara i god överensstämmelse med skillnaderna i förlustfaktorer.

Några av modellmätningarna uppvisar sämre överensstämmelse med beräknade stegljudsnivåer. Orsaken kan här ligga i en annan förlustfaktor än den antagna, vilket ej kunnat kontrolleras inom projektets ram.

Uppmätta stegljudsnivåer i fält bestäms av de verkliga förlustfaktorerna vilka är beroende av dimensioner, byggmaterial och inspänningsförhållanden. En systematisk kartläggande genomgång av skenbara förlustfaktorer för olika bjälklagsmontage i färdig byggnad vore av stort värde för predikteringen av stegljudsnivåer.

Avvikelseorna vid höga frekvenser i fig. 40-41 kan bero på att en något för hög förlustfaktor använts i beräkningarna, jfr fig. 43 och fig. 3.

Figur 12 visar att någon förhöjd ljudutstrålning ej skall påräknas vid koincidensfrekvenserna för TT-bjälklag.

Beräkningsmetoden har i några fall jämförts med fullskalemätresultat, se figurerna 44-47. Använda ingångs-



data anges intill diagrammen. Nedan kommenteras dessa tillsammans med modellmätresultaten.

För planparallella betongbjälklag är överensstämmelsen mycket god, se figur 44. Beräkningsprogrammet tar hänsyn till den ökande strålningsfaktorn vid koincidensfrekvensen, som i detta fallet ligger vid 500 Hz. Denna effekt återfinnes i fullskalemätningarna.

Ett exempel på jämförelse med TT-bjälklag visas i figur 45. Inspänningsgraden 1,6 har använts i beräkningen, vilket ger god överensstämmelse. I modellmätningarna understiger uppmätt första subpanelresonans beräknad resonansfrekvens om inspänningsgraden 3,1 använts. Från denna frekvens och uppåt erhålles en förhöjd stegljudsnivå, varför det är av stort intresse att kunna förutsäga det exakta läget. De utförda mätningarna tyder på att värdet 1,6 är lämpligast, vilket särskilt bjälklaget T9 ger belägg för. Denna inspänningsgrad motsvarar fritt upplagd platta, vilket innebär att böjvågen vid första plattmoden kontinuerligt övergår till nästa subpanel, vilken således bör svänga i motfas vid denna frekvens. Balken har då ingen motsvarande förhöjning av sina vertikala vibrationer (se figur 33) utan deltar i denna svängningsmod med torsionssvängningar.

Figur 46 visar resultatet för hålbjälklag. Här, liksom i modellmätningarna på bjälklag H6, förefaller beräkningsmodellen överskatta nivån vid de lägsta frekvenserna och underskatta nivån vid de högre frekvenserna. En större lutning erfordras således i den beräknade kurvan. Tendensen föreligger även hos modellbjälklagen H1-H5, där stegljudsnivån totalt sett dock blir lägre

än beräknat. Det har ej varit möjligt att inom projektets ram finna de detaljerade orsakerna till avvikelserna, men modellresultatet visar ett visst beroende av håltätheten såtillvida att täta hål ger bättre isolering än vad beräkningarna utgående från ytvikt och böjstyvhet anger (dubbelväggens isolering?). Tunnt gipslager ovan hål kan också lokalt ge vekt underlag för hammaren med lägre nivå som följd.

Möjligt är vidare att skenbara förlustfaktorn har ett annorlunda förlopp än det antagna, vilket ej undersökts närmare.

Resonemanget om gles modtätthet vid låga frekvenser bör också ha berättigande här, eftersom spännvidderna ofta är korta för hålbjälklag.

Med ledning av resultaten har beräkningsprogrammet för hålbjälklag sedermera justerats för att ansluta bättre till mätresultaten. Den ökade lutningen kan åstadkommas genom addition av  $\frac{D}{h_h} \cdot 10 \cdot \log \frac{f}{250}$ , varvid min- (9.1)

skande håldiamter vid bibehållen tjocklek leder till likhet med den planparallella plattans stegljudsnivå. Skärningsfrekvensen 250 Hz har erhållits empiriskt ur mätresultaten.

För kupolbjälklag saknas i stor utsträckning mätresultat. Ett objekt har dock kunnat jämföras med beräknade stegljudsnivåer, se figur 47. Vid de lägsta frekvenserna erhålles även här en överskattning i beräkningarna, vilka å andra sidan stämmer väl med den massekvivalenta planparallella plattans stegljudsnivå. Detta tyder på en ökad strålningsdämpning vid låga frekvenser. I området kring första subpanelresonans är överensstämmelsen ganska god. För utstrålningen från subpanelerna vid höga frekvenser överskattas nivåerna med ca 5 dB, troligen beroende på balkarnas skärmande effekt och lokalens utsträckning.

Kupolbjälklagsmätningen styrker tendensen att subpanelens inspänningsgrad närmar sig 1,6 då förhållandet mellan hela bjälklagets punktimpedans och subpanelens punktimpedans blir stort.

Modellmätningarna är i första hand ett redskap för att studera hur variationer i geometriska data påverkar stegljudsnivån. Som visats i de föregående kapitlen har subpanelresonansernas frekvensområden hos TT-bjälklag resp. stegljudskurvans lutning för hålbjälklag kunnat preciseras på ett sätt som den teoretiska behandlingen ej medger.

Om modellresultatet direkt skall omsättas till stegljudsnivåer i fullskala måste följande parametrar behandlas i båda fallen eftersom de modifierar stegljudskurvans utseende (se figur 48).

- Densitet hos byggmaterialet
- Dynamisk elasticitetsmodul
- Skenbar förlustfaktor (beroende av inre termiska förluster resp. anslutningssätt till övriga byggnadsdelar)
- Modtäthet (spänningsberoende)
- Brytfrekvens p.g.a. lokal deformation under hammaren

Av dessa är skenbara förlustfaktorn svårast att förutsäga och samtidigt viktig för resultatet. Projektet har emellertid gett en viss vägledning.

Modtätheten kan beräknas men inverkan på resultatet varierar från fall till fall. För små bjälklagsytor kan 5-10 dB lågfrekvensdämpning erhållas, för stora ytor kan inverkan försummas.

Brytfrekvensen på grund av lokal kontaktdeformation har mindre praktisk betydelse eftersom inverkan är ringa och de högsta frekvenserna ofta dämpas genom golvbeläggningen.

Densitet och E-modul bestämmer bl.a. koincidensfrekvenserna (gränsfrekvenserna) som ej alltid förflyttas skalenligt. Detta kan medföra ett annorlunda förlopp hos strålningsdämpningen.

Vid transformationen av modellresultat till fullskala har vi funnit det lämpligt att låta den framtagna beräkningsmodellen utgöra mellanled. Beräkningsprogrammet har därvid modifierats utgående från de samband som empiriskt erhållits genom modellmätningarna, samt genom jämförelser med tillgängliga fullskalemätningar.

Följande ändringar har inlagts:

1. Planparallella bjälklag

Inga ändringar.

2. TT-bjälklag och kupolbjälklag

För subpanelernas inspänningsgrad användes värdet 1,6, d.v.s.  $\pi/2$ .

För TT- och kupolbjälklagen skulle en reducering av ljudutstrålningen vid frekvenser över första luftljudsresonans mellan balkar eventuellt vara motiverad, men har ej inlagts i brist på tillräckligt omfattande underlag.

3. Hålbjälklag

En ökad lutning på stegljudskurvan i fullskala åstadkommes genom addition av  $\frac{D}{h_h} \cdot 10 \cdot \log \frac{f}{250}$ , ett empiriskt funnet värde.

## 11 STEGLJUDSKATALOG

11.1 Råbjälklag

Med hjälp av det via modellmätningarna modifierade datorprogrammet har stegljudsnivåer  $L_{10}$  beräknats för ett åttiotal bjälklag. Dimensioner har valts i anslutning till marknadens sortiment. Pågjutningens tjocklek har varierats. Följande ingångsdata bör betongbjälklag har använts:

Dynamisk E-modul	$2,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
Densitet	$2400 \text{ kg/m}^3$
Upplagslängd	6,0 m
Upplagsbredd	4,8 m
Inre förlustfaktor	0,5%
Randförluster vid 100 Hz	5%
Brytfrekvens $f_0$	5000 Hz

Samtliga stegljudsnivåer gäller utan undertak.

11.2 Stegljudsförbättring hos mjuka golveläggningar

Stegljudsförbättringen hos en elastisk golveläggning, typ mjuk matta direkt på råbjälklaget, karaktäriseras av en brytfrekvens,  $f_0$ , över vilken stegljudsnivån grovt sett reduceras med 12 dB per oktav. På grund av att golveläggningarna ofta är behäftade med höga inre förluster kan en viss förbättring även erhållas vid frekvenser därunder, upp till 5-6 dB (Lindblad 1968). I det följande bortses dock från sådana effekter. Stegljudsförbättringen approximeras i beräkningarna med två räta linjer enligt figur 49. I figuren visas också ett exempel på hur förbättringskurvan påverkar stegljudsnivån från ett TT-bjälklag. Notera hur stegljudsisoleringen radikalt förbättras om golveläggningens brytfrekvens förskjutes mot frekvenser lägre än första subpanelresonans.



Brytfrekvenser för olika typer av mjuka mattor kan hämtas ur BFR rapport R44/72 (Svensson, 1972). Här lämnas endast några exempel:

$f_o$ (Hz)	Matta
100	6,0 mm öglad tuft med våffla, lös
200	3,5 mm nålfilt, klistrad eller lös
400	3,5 mm plastfilt, klistrad
800	3,2 mm kork + plast, klistrad
1600	2,5 mm linoleum, klistrad

### 11.3 Stegljudsnivåer med och utan mjuka golvbeläggningar

Råbjälklagsdata för de 80 olika bjälklagen har via ett datorprogram kombinerats med approximerade stegljudsförbättringskurvor enligt ovan. Därpå har Index för stegljudsnivå,  $I_i$ , beräknats enligt SIS 025253 för samtliga kombinationer. Brytfrekvensen,  $f_o$ , har varierats i oktaver 50-3150 Hz, där 3150 Hz motsvarar råbjälklag eller en mycket hård golvbeläggning. Resultatet redovisas i figurerna 50-64.

Ur beräkningarna hämtas följande exempel på kombinationer med ungefär samma ekvivalenta ytvikt.  $M_s = 360-380 \text{ kg/m}^2$ :

Typ	<u>Dimensioner</u> <u>cm</u>			<u>Böjstyvhet</u> <u><math>B_x (\text{Nm} \cdot 10^7)</math></u>	<u>Högsta brytfrekvens <math>f_o</math></u> <u>för <math>I_i = 63 \text{ dB}</math></u>
Plant	$h_p = 16$			1,0	250 Hz
Hål	$h_h$	$s$	$D$		
	28	22	18,5	4,5	500 Hz
	23,5	18	14	2,8	400 Hz
	22	13,9	10,8	2,4	400 Hz



Typ	Dimensioner					Böjstyvhet <u><math>B_x(\text{Nm} \cdot 10^7)</math></u>	Högsta bryt- frekvens $f_o$ <u>för <math>I_i = 63 \text{ dB}</math></u>
	<u>cm</u>						
TT	<u><math>h_p</math></u>	<u><math>h_b</math></u>	<u>s</u>	<u><math>b_1</math></u>	<u><math>b_2</math></u>		
"	11	25	120	23	19	3,7	160 Hz
"	11	35	120	23	17	6,3	160 Hz
"	11	25	60	12	9	3,7	315 Hz
Kupol	11	15	120	19	15	1,3	250 Hz

Analogt exemplifieras bjälklag med lika böjstyvhet längs förstyvningarna,  $B_x = 4,1 - 4,5 \cdot 10^7 \text{ Nm}$ :

Typ	Dimensioner			Ekvivalent ytvikt $M_s$ <u>kg/m<sup>2</sup></u>	Högsta bryt- frekvens $f_o$ <u>för <math>I_i = 63</math> dB</u>
	<u>cm</u>				
Plant	$h_p = 26$			620	800 Hz
Hål	$h_h$	<u>s</u>	<u>D</u>		
	28	22	18,5	380	500 Hz
	26,5	18	13	460	500 Hz
	28	22	20	330	400 Hz
	26	13,9	10,8	470	630 Hz
TT	$h_p$	$h_b$	<u>s</u>	<u>b<sub>1</sub></u>	<u>b<sub>2</sub></u>
	8	30	60	12	8,5
	11	35	120	13	7

#### 11.4 Jämförelser med fältmätningar

Fältmätningar på planparallella homogena bjälklag, ribb-bjälklag (TT och Kaiser) och hålbjälklag har inventerats ur material från Statens Planverk, HSB, byggelementleverantörer och Ingemanssons Ingenjörbyrå. Inventeringen har gällt såväl råbjälklag som bjälklag med mjuka golvbeläggningar av typ mattor. Med hjälp av den modifierade datorberäkningsmodellen har stegljudsnivåer och index för stegljudsnivå  $I_i$  predikterats för motsvarande konstruktioner. Resultatet framgår av nedanstående tabeller, där även beräkningens marginal kontra medelvärdet av fältvärdena redovisas.

Planparallella\_bjälklag

Tjocklek cm	Brytfrekvens hos matta, Hz	Antal mätningar	Uppmätt I <sub>i</sub> dB	Beräknat I <sub>i</sub> dB	Marginal dB
16	råbj.	5	81	83	2
	500	3	57	67	10
18	råbj.	11	81	81	0
	315	5	59	64	5
	400	2	60	65	5
19	315	2	60	63	3
	400	20	59	64	5
	500	15	59	65	6
	630	21	61	66	5
20	råbj.	4	81	80	-1
	200	8	58	60	2
	250	22	58	61	3
	315	306	60	62	2
	400	362	61	63	2
	500	24	59	64	5
	630	92	61	65	4
	800	1	63	66	3
	2500	1	72	76	4
21	250	2	59	61	2
	315	12	57	62	5
	400	2	58	63	5
	630	1	61	65	4
22	500	4	59	63	4
	630	5	57	64	7
25	400	<u>2</u>	53	60	<u>7</u>
		932			

Vägt medelvärde exkl. råbjälklagen (912 mätn.): 2,7 dB

Standardavvikelsen i fältmätresultaten är i storleksordningen 2 dB. Totalt kan därför predikteringsfelet för planparallella bjälklag anses vara 1-5 dB med ca 70% sannolikhet. I genomsnitt erhålles 3 dB säkerhetsmarginal.

### Hålbjälklag

Tjocklek cm	Håldiam. cm	c/c hål cm	Brytfrekvens hos matta, Hz	Antal mätningar	Uppmätt I <sub>i</sub> dB	Beräknat I <sub>i</sub> dB	Marginal dB
18	10,5	15	råbj.	3	90	90	0
			250	3	62	63	1
22	10	14,5	råbj.	8	87	85	-2
			400	2	60	62	2
24,5	10,8	15	630	3	61	65	4
28	18,5	22,5	råbj.	2	91	82	9
			200	1	57	59	2
			315	2	59	62	3
			630	2	62	65	3
30,5	18,5	22,5	500	1	60	62	2
			2000	<u>1</u>	75	78	<u>3</u>
				28			

Vägt medelvärde exkl. råbjälklagen (15 mätn.): 2,5 dB

Predikteringsnoggrannheten är av samma storlek som för planparallella bjälklag.

### Ribbjälklag

Det dominerande antalet fältmätningar har skett med undertak involverat. Följande sammanställning ger en uppfattning om dess inverkan.

Balk- höjd	Tryck- platta cm	c/c balk cm	Bryt- frekv. hos matta, Hz	Undertak mm	Uppmätt $I_i$ dB	Beräknat $I_i$ dB	Marginal dB
24,5	14	62	630	Sordinplattor	64	65	1
24,5	8	62	2000	11 gips på råspont	76	86	10
23,5	9,5	62	500	m.u. <sup>1)</sup> , 13 gips på glespanel	65	68	3
"	"	"	1000	m.u., 13 gips på reglar c/c 90 cm + spaltpanel	69	77	8
23,5	9	62	råbj.	m.u., 13 gips på glespanel	76	89	13
"	"	"	630	"	62	72	10
"	"	"	80	"	66	53	-13
				$I_i^{x)}$ :	59	49	-10
35	12	120	1600	2x13 gips	61	78	17
25	12	120	1600	m.u., 2x13 gips	57	78	21
25	16	120	1600	m.u., 2x13 gips	57	75	18
38	12	120	2000	Soundless	60	81	21

Vid de sju första mätningarna har undertaket reglats mot kassettbenen (Kaiserbjälklag). Resultaten uppvisar stora variationer i undertakens tilläggsisolering. Grovt sett erhålles med beräkningsmetoden ca 13 dB marginal vid en gipsskiva, 19 dB marginal vid två gipsskivor, fribärande från bjälklaget. Notera att en höjning av stegljudsnivån vid låga frekvenser kan erhållas om undertaket är upphängt på glespanel stumt mot kassettbenen.

x) 8 dB-regeln bortses från vid 100 och 125 Hz

1) m.u = mineralull

Projektarbetet har lett till tre praktiskt användbara slutprodukter:

- a) En modellteknik som möjliggör enklare provning av olika bjälklagsutföranden än i fält. Resultaten har visat att provytan bör vara något större än i försöken, för tillräcklig modtäthet. Vidare är det väsentligt att kontrollera skenbara förlustfaktorn innan resultaten appliceras på fullskalefallet. Med inverkan av modelltekniken har inverkan av bjälklagens geometri på stegljudsnivån kunnat kartläggas ytterligare. Sålunda har för hålbjälklag framtagits en korrektionsterm

$$\frac{D}{h_h} \cdot 10 \cdot \log \frac{f}{250} \quad (9.1)$$

som efterliknar den större lutningen i stegljudskurvorna för dessa bjälklag.

För ribbjälklag har subpanelernas inspänningsgrad befunnits ligga i närheten av  $q = \pi/2$  även då balkarna är tunga i förhållande till subpanelerna, d.v.s. en svängningsform som snarare liknar fritt upplagda än fast inspända plattor. Med finita-element-metoden borde datorberäkningar kunna ge ytterligare information om var gränsen för ortotropin går, d.v.s. från vilken frekvens stegljudsnivån höjes på grund av subpanelernas egensvängningar.

- b) En datorberäkningsmodell som förutom råbjälklag av olika geometri även kan hantera inverkan av olika mjuka golvbeläggningar. Bestämningsnoggrannheten ger ca  $+3 \pm 2$  dB marginal för  $I_1$ -värdet. Marginalen hänför sig framför allt till den glea modtätheten vid låga frekvenser (jämförelsematerialet gäller huvudsakligen bjälklag med korta

spännvidder i bostäder). En viss del kan troligen också tillskrivas variationer i skenbara förlustfaktorn. I datorprogrammet har för de genomförda beräkningarna använts värdet  $\eta = 10\%$  vid 100 Hz, avtagande med 1,5 dB/oktav mot värdet 0,4% vid höga frekvenser. Gedefeldt (1973) redovisar mycket högre förlustfaktorer i några fall, dock gällande stora bjälklag. Se Ljunggren och Ottosson (1978).

Genom att använda anpassade värden för skenbara förlustfaktorn i varje enskilt fall borde marginalen kunna minskas. För anisotropa bjälklagstyper borde en erfarenhetsbank byggas upp, exempelvis genom vibrationsmätning på bjälklaget parallellt med ordinarie fältmätningar av stegljudsnivå, varpå smalbandsanalys av bjälklagsresonanserna utföres för bestämning av 3 dB - bandbredderna och därur skenbara förlustfaktorerna. Ett exempel på sådan analys visas i figur 65.

Relativa bestämningar kan ske med betydligt bättre noggrannhet, uppskattningsvis  $\pm 0,5$  dB.

- c) En uppsättning diagram över  $I_1$ -värden för olika kombinationer av bjälklag och mjuka mattor (fig. 50-64) att användas vid akustisk projektering av byggnader med beaktande av ovanstående marginaler. Denna katalog kan sedemera kompletteras med datorprogrammets hjälp.

## REFERENSER

Huffington, N.T. (1956)

"Theoretical Determination of Rigidity Properties of Orthogonally Stiffened Plates", Journal of Applied Mechanics, vol. 23, 1956, p. 15.

Hoppmann, W.H.II, Huffington, N.J. & Magness, L.S. (1956)

"A Study of Orthogonally Stiffened Plates", Journal of Applied Mechanics, vol. 23, 1956, p. 343.

Heckl, M. (1960)

"Untersuchungen an Orthotropen Platten", Acustica, vol. 10, 1960, p. 109.

Heckl, M. (1961)

"Wave Propagation on Beam-plate Systems", Journal of the Acoustical Society of America" vol. 33, 1961, p. 640.

Maidanik, G. (1962)

"Response of Ribbed panels to Reverberant Acoustic Fields", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 34, 1962, p. 809.

Cremer, L. och Heckl, M. (1967)

"Körperschall", Springer-Verlag, 1967.

Lindblad, S. (1968)

"Impact Sound Characteristics of Resilient Floor Coverings", Dissertation in Building Acoustics, Lund Institute of Technology, 1968.

Ver, I.L. (1971)

"Impact Noise Isolation of Composite Floors", Journal of the Acoustical Society of America, vol. 50, 1971, p. 1042.



Beranek, L.L. (1971)

"Noise and Vibration Control", McGraw-Hill,  
New York, 1971.

Svensson, J. (1972)

"Förhandsbestämning av stegljudsförbättring vid mjuka  
golvbeläggningar - Massivbjälklag", Statens råd för  
byggnadsforskning, rapport R44/72.

Cederfeldt, L. (1973)

"Ljudisolering för profilerad stålplåt samt en dubbel-  
konstruktion utformad med profilerad stålplåt".  
Lunds tekniska högskola, inst. för byggnadsakustik,  
1973.

Gadefeldt, G m.fl. (1973)

"Punktexciterat ljud i byggnader", Statens råd för  
byggnadsforskning, projekt 374/64.

Lindblad, S. (1974)

"Kraft-intryckningskurvor och stegljudsförbättrings-  
kurvor direkt ur hammarens stötförlopp med speciellt  
konstruerad fallapparat", Statens råd för byggnads-  
forskning, projekt C 689, S50/1974.

Ljunggren, S. (1974)

"Luftljudsisolering hos anistropa bjälklag", Statens  
råd för byggnadsforskning, projekt C566  
(Ingemanssons Ingenjörbyrå AB, rapport H-2603-A).

Einarsson, S. (1976)

"Punktimpedans och stegljudsnivå hos kupolbjälklag",  
Nordiska Akustiska Sällskapetets möte 1976 i Sandefjord,  
Norge.

Ljunggren, S och Ottosson, B (1978)

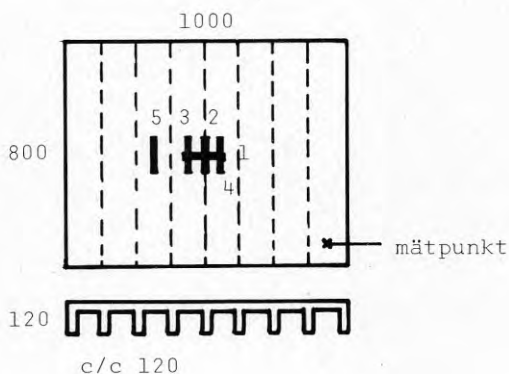
"Luft- och stegljudsisolering hos stora bjälklag".

Nordisk Akustisk Møde 1978 i Odense , Danmark.

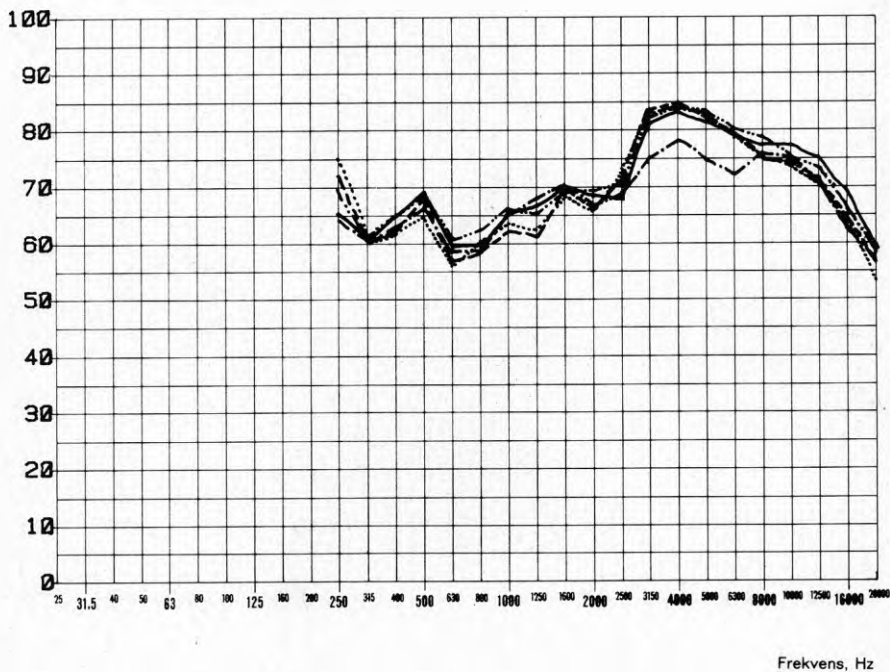
FIGURER 1-66

Vibrationsmätningar på bjälklag T9

Hammarapparatpos.

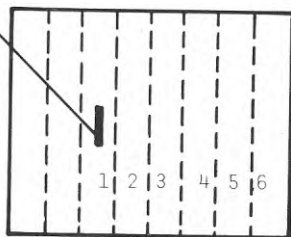


Vibrationshastighetsnivå  
dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s



Vibrationsmätningar på bjälklag T9

Hammar-  
apparat-  
position

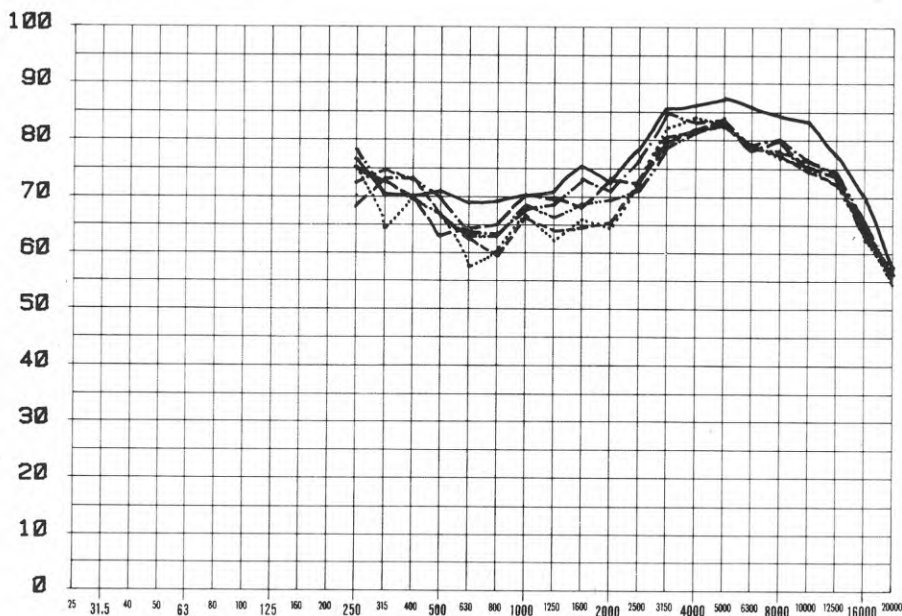


Mätfält

- 1
- - - 2
- · — 3
- · - 4
- - - 5
- 6

3 accelerometer-  
positioner per  
mätfält

Vibrationshastighetsnivå  
dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s



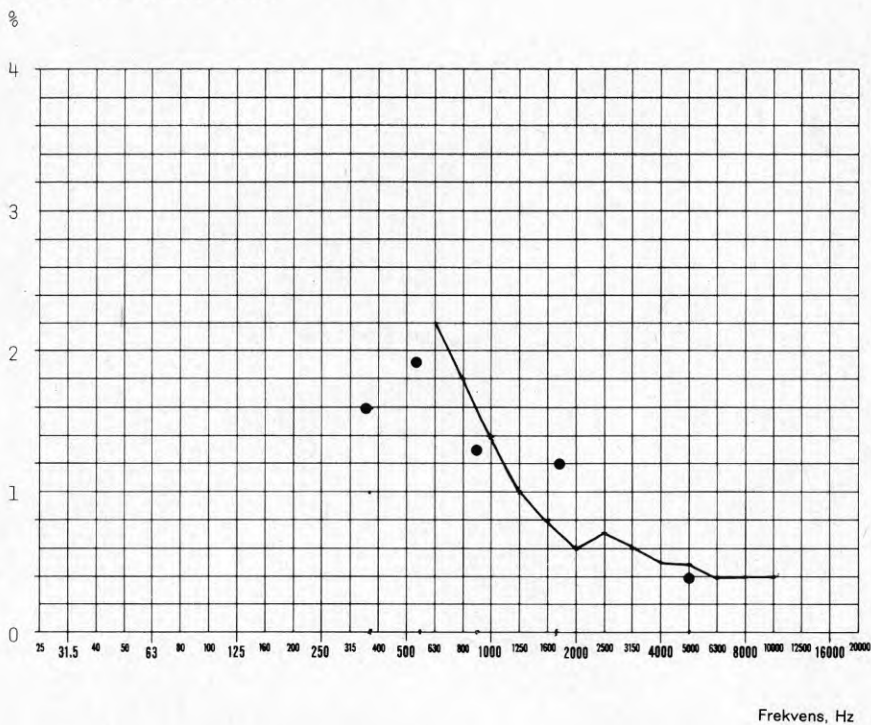
Frekvens, Hz

# Förlustfaktormätningar på modellbjälklag P2

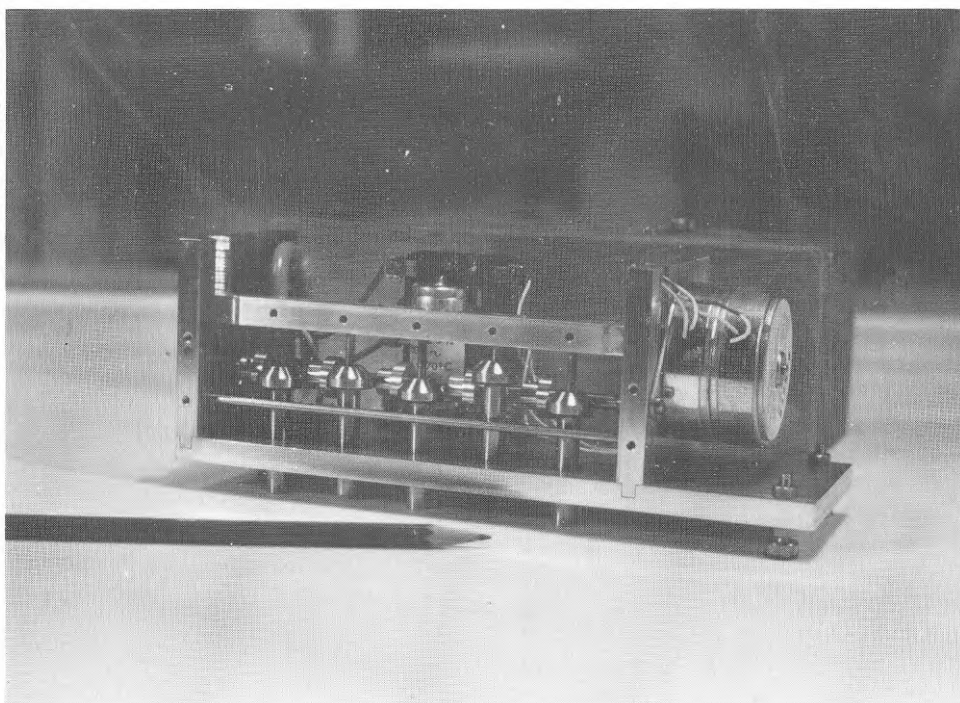
- genom efterklangstidsmätning (avbruten hammarapparats-  
excitering). Förlustfaktorn =  $2,2/T \cdot f$
- genom sinusexcitering av egenmoderna (punktadmittans-  
mätning). Förlustfaktorn =  $4f_{3dB}/f_o$

Se även figurerna 43 och 65.

Skenbar förlustfaktor



Modellhammarapparat i skala 1:4





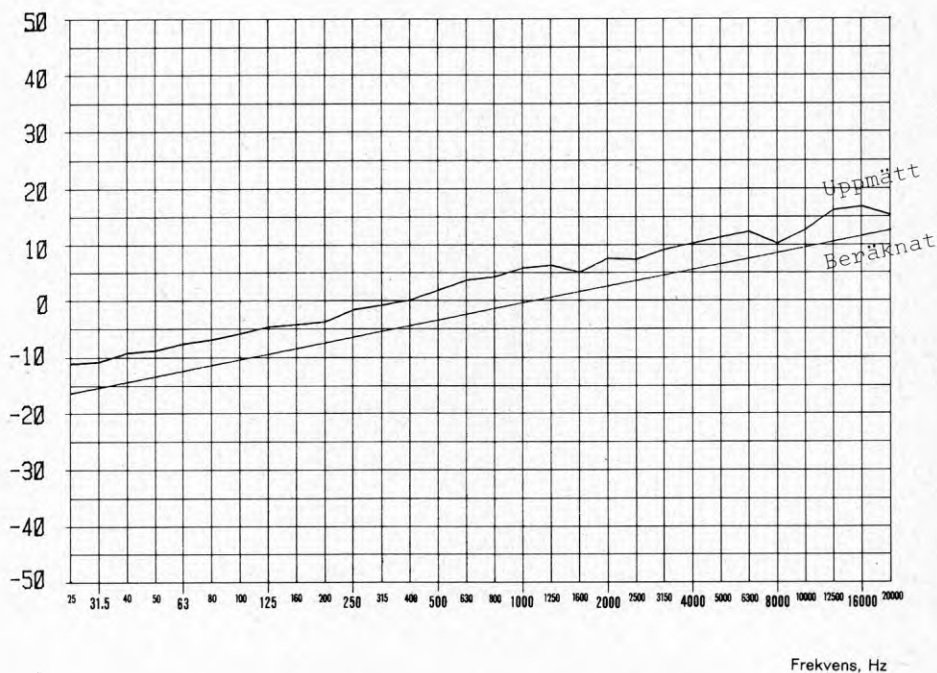
Modellhammarapparatens exciteringskraft

Effektivvärden i tersband.

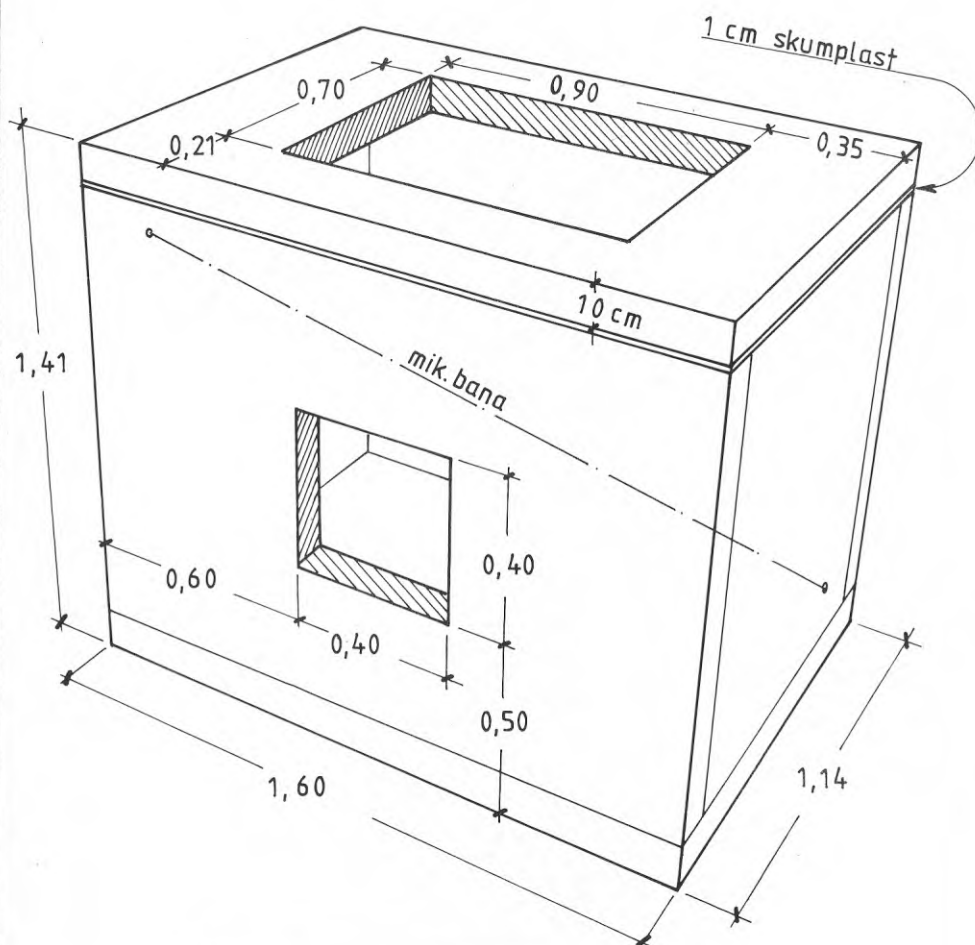
Gäller 5 hammare (mätt på en).

Effektiv fallhöjd 10 mm.

Kraftspektrum fr. hammarapparat  
dB rel. 1 N



Modellmätrum, uppbyggt av 10 cm lättbetongplank,  
invändigt bestruket med betongfärg.



$1,59 \text{ m}^3$  innervolym  
 $0,63 \text{ m}^2$  mätyta  
abs.yta c:a  $0,6 \text{ m}^2$   
 $0,63 \text{ m}^2$  abs. motsv.  $T = 0,40 \text{ sek}$

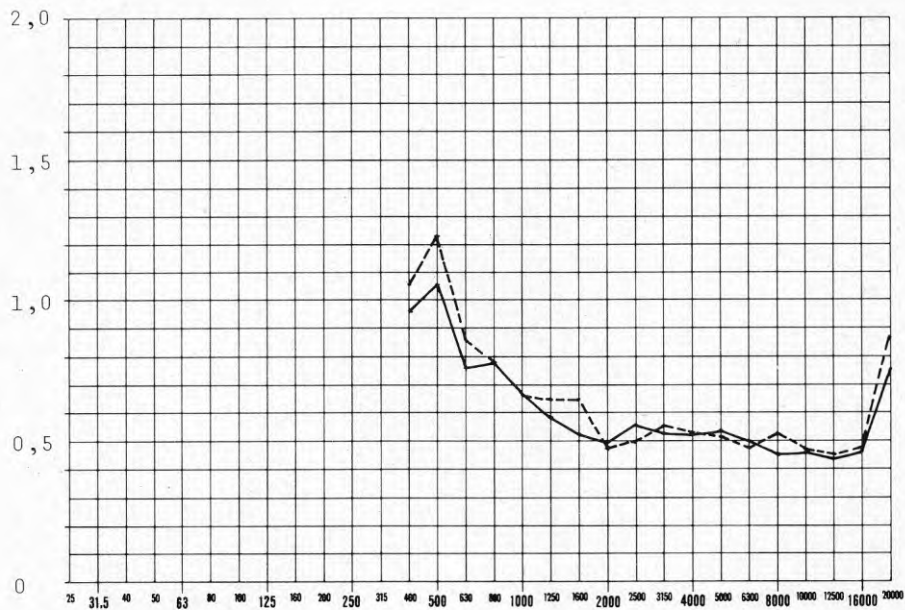
Modellmättrumets efterklangstid

Mätning genom avbruten hammarapparatsexcitering  
av bjälklag

— T10

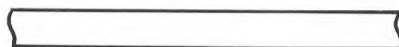
- - - P2

Efterklangstid  
sekunder



Frekvens, Hz

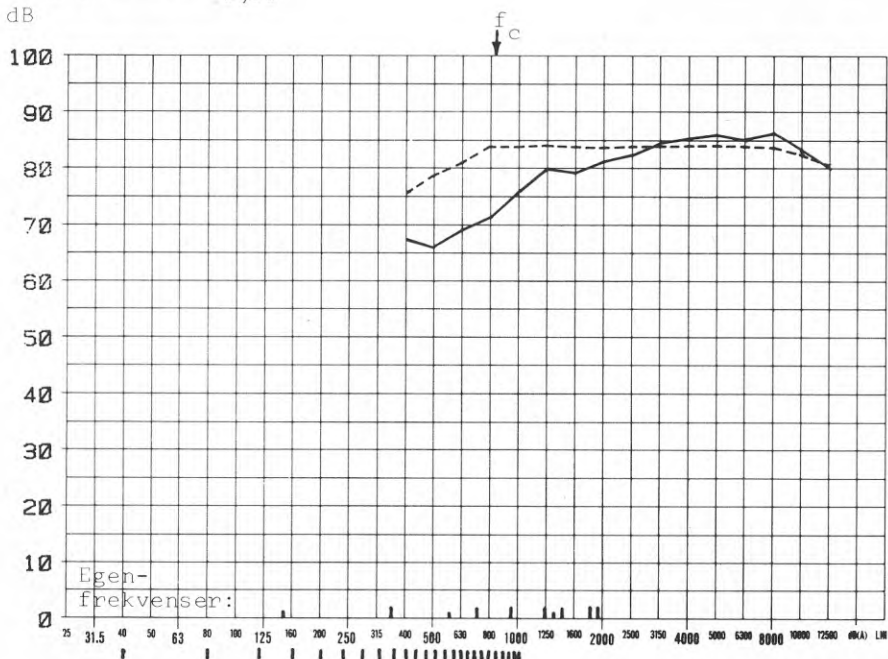
Modellbjälklag P1



32 mm

— Uppmätt stegljudsnivå  
- - - Beräknad "

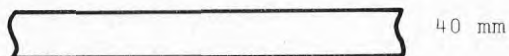
Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB



Hammarapparatus spektrallinjer

Frekvens, Hz

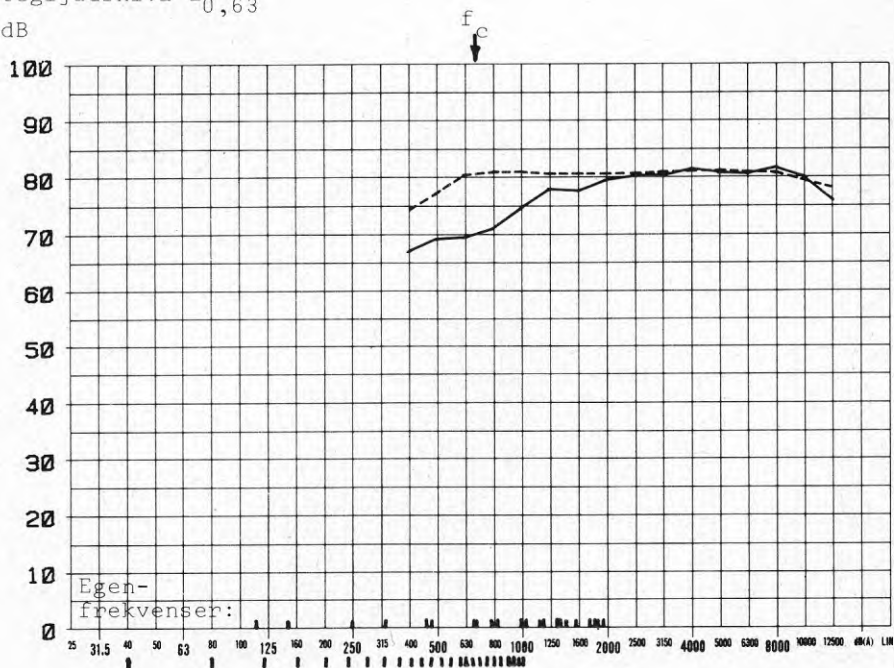
Modellbjälklag P2



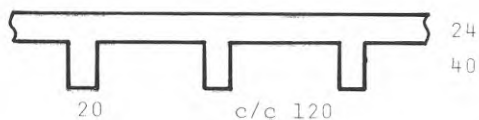
— Uppmätt stegljudsnivå  
- - - Beräknad "

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$

dB

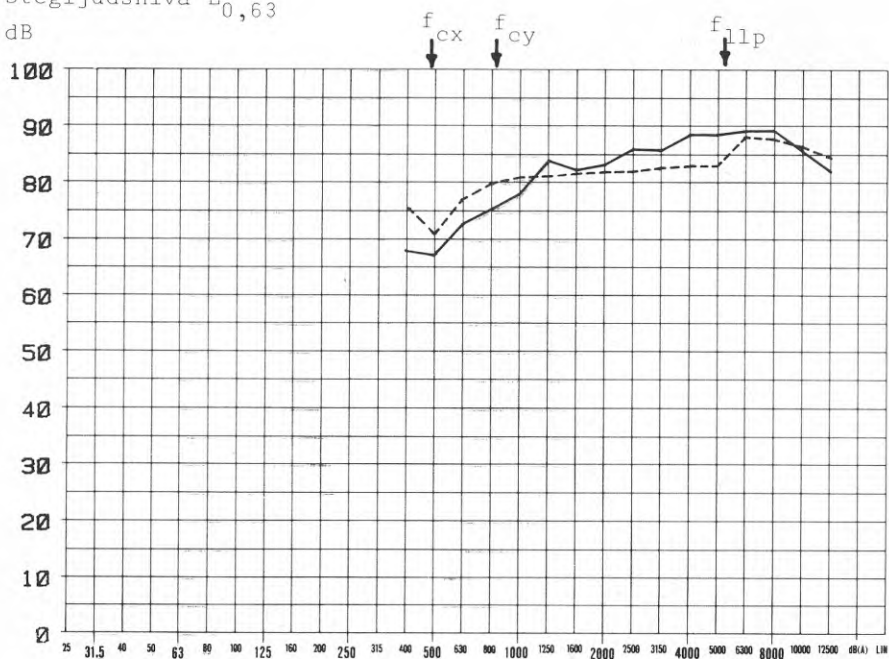


Modellbjälklag T1



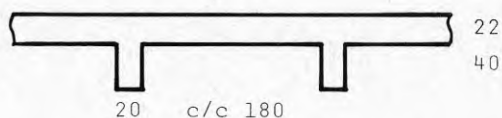
— Uppmätt stegljudsnivå  
- - - Beräknad "

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB



Frekvens, Hz

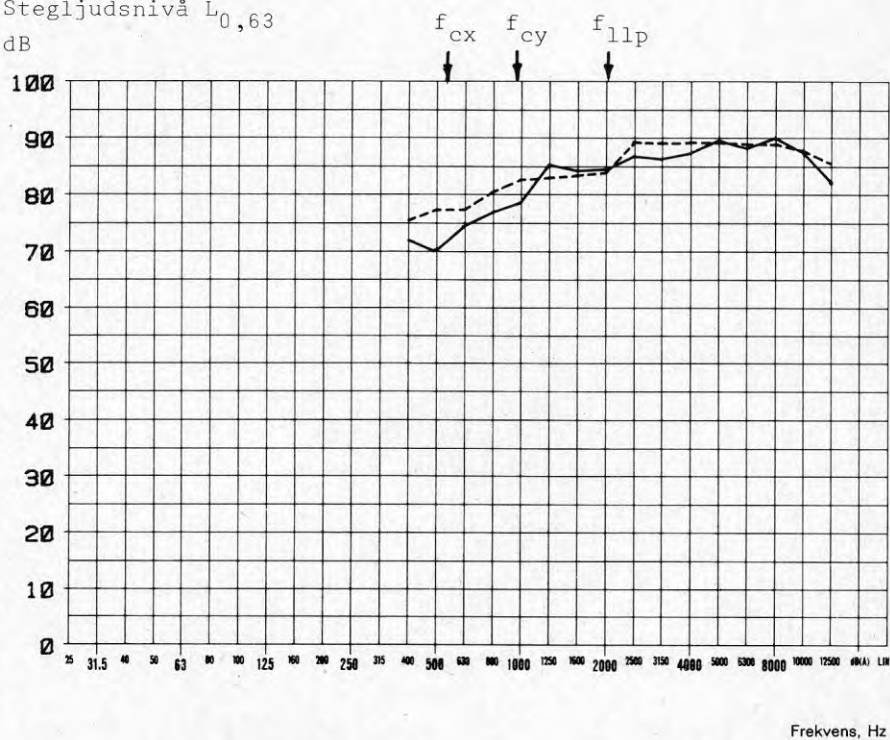
Modellbjälklag T2



— Uppmätt stegljudsnivå

- - - Beräknad "

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB



Frekvens, Hz



Modellbjälklag T3

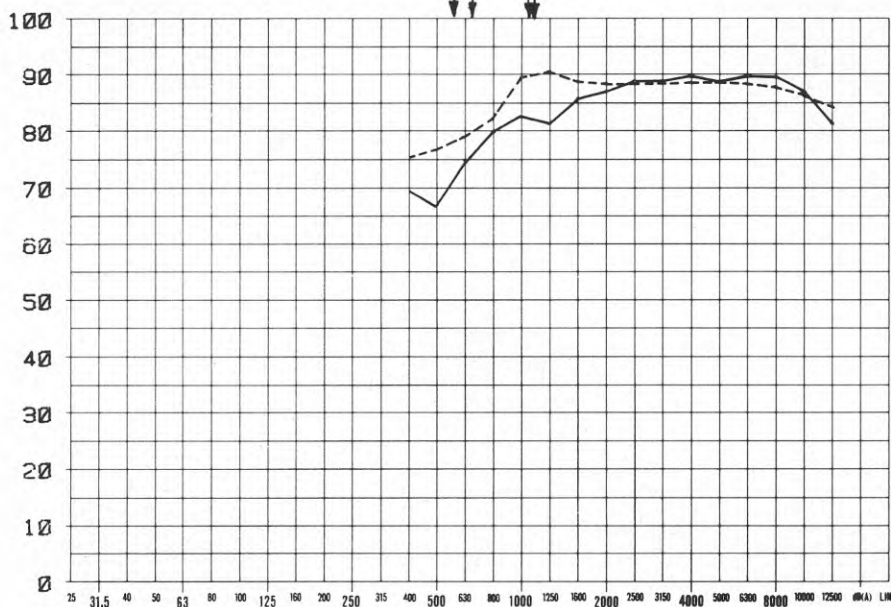


— Uppmätt stegljudsnivå

- - - Beräknad "

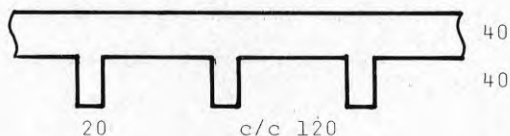
Stegljudsnivå  $L_{0,63}$

dB



Frekvens, Hz

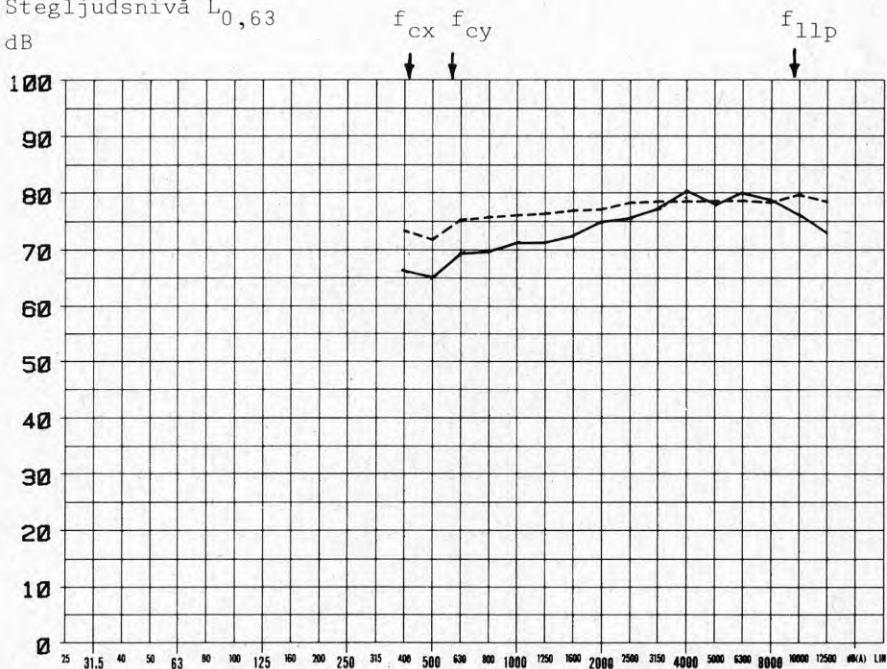
Modellbjälklag T4



— Uppmätt stegljudsnivå

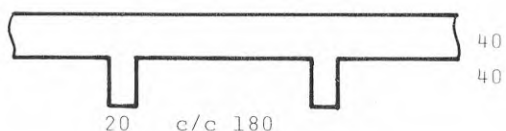
--- Beräknad "

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB



Frekvens, Hz

Modellbjälklag T5

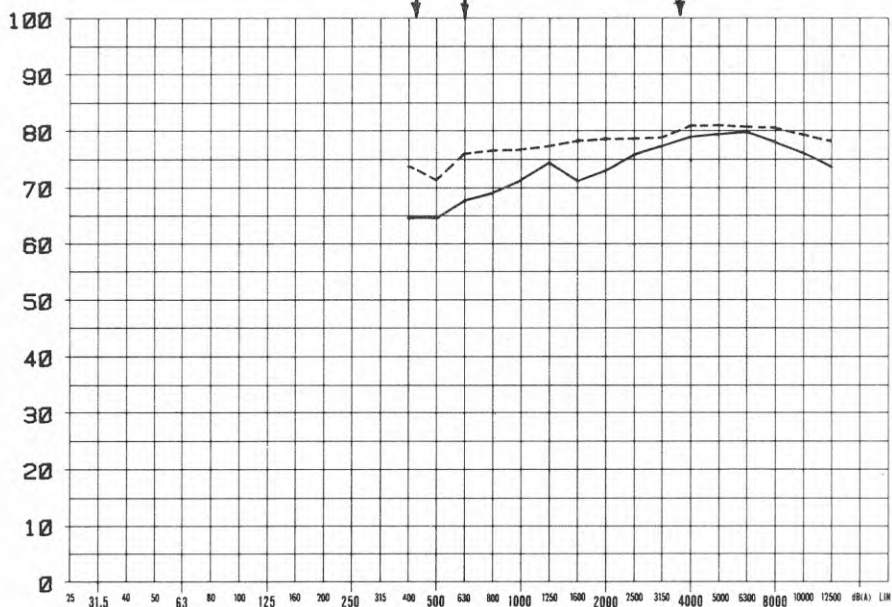


— Uppmätt stegljudsnivå

- - - Beräknad "

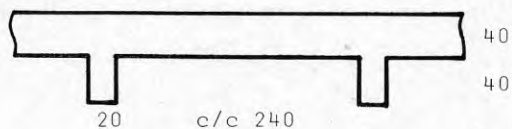
Stegljudsnivå  $L_{0,63}$

dB



Frekvens, Hz

Modellbjälklag T6



— Upmätt stegljudsnivå

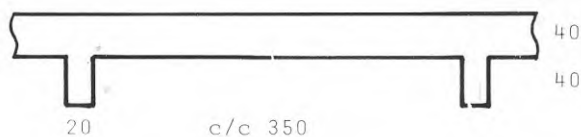
- - - Beräknad "

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB



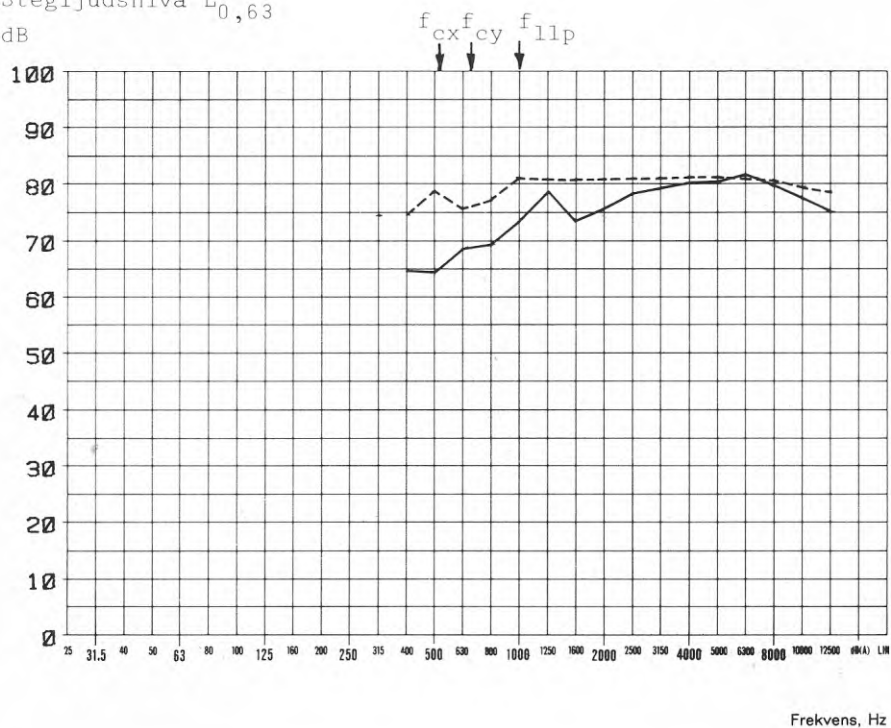
Frekvens, Hz

Modellbjälklag T7



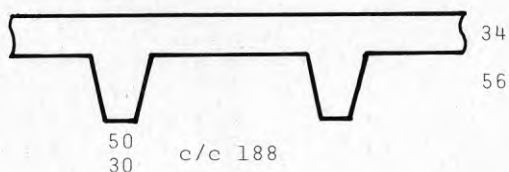
— Uppmätt stegljudsnivå  
- - - Beräknad "

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB



Frekvens, Hz

Modellbjälklag T8

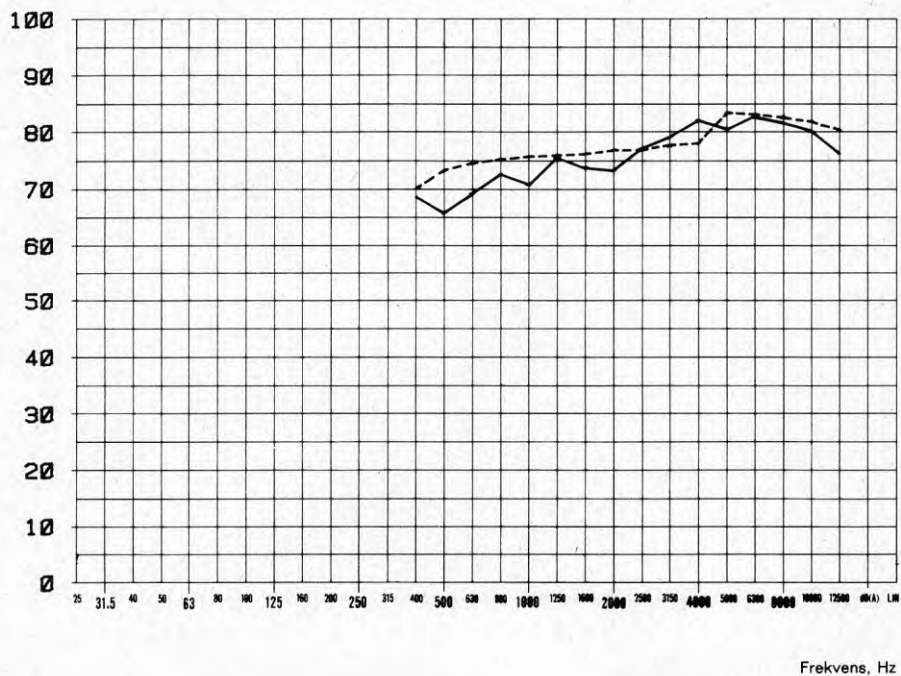


— Uppmätt  
- - - Beräknad

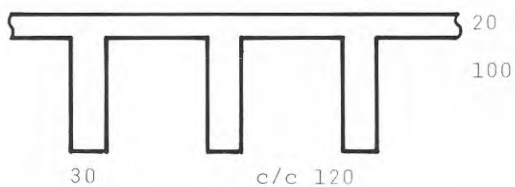
Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB

$f_{cx}$   $f_{cy}$

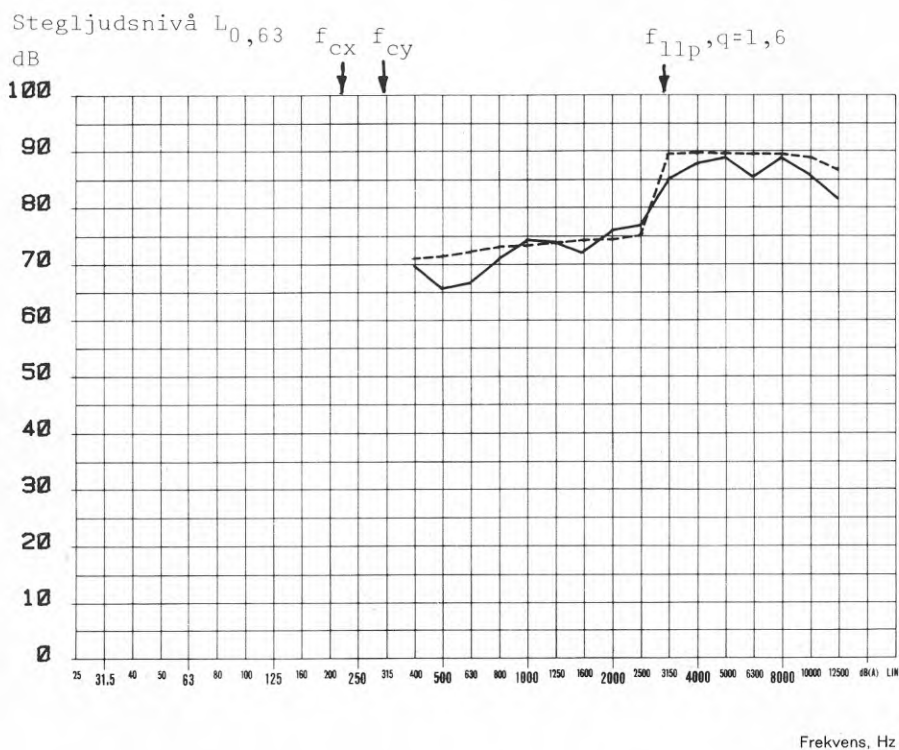
$f_{llp}$



Modellbjälklag T9

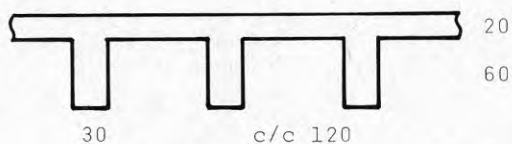


— Uppmätt  
- - - Beräknad





Modellbjälklag T10



— Uppmätt  
- - - Beräknad

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB



Modellbjälklag H1

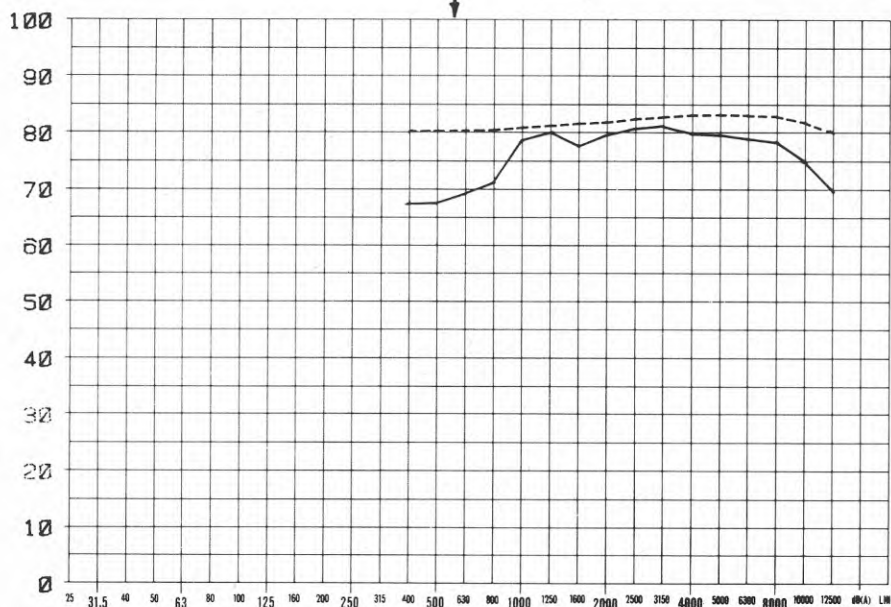


Hål  $\emptyset$  19 c/c 25

— Uppmätt  
- - - Beräknad

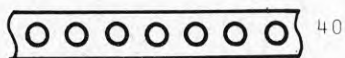
Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB

$f_{cx}, f_{cy}$



Frekvens, Hz

Modellbjälklag H2



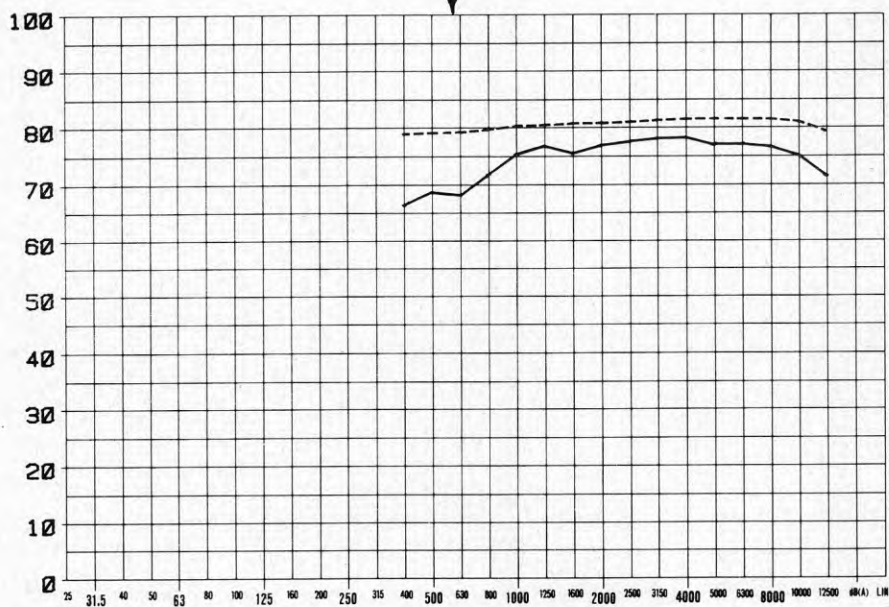
Hål Ø19 c/c 35

— Uppmätt

- - - Beräknad

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB

$f_{cx}, f_{cy}$



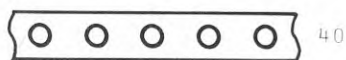
Frekvens, Hz

INGEMANSSONS  
INGENJÖRSBYRÅ AB

GÖTEBORG  
STOCKHOLM MALMÖ  
ÖRNSKÖLDSVIK

Figur 22

Modellbjälklag H3



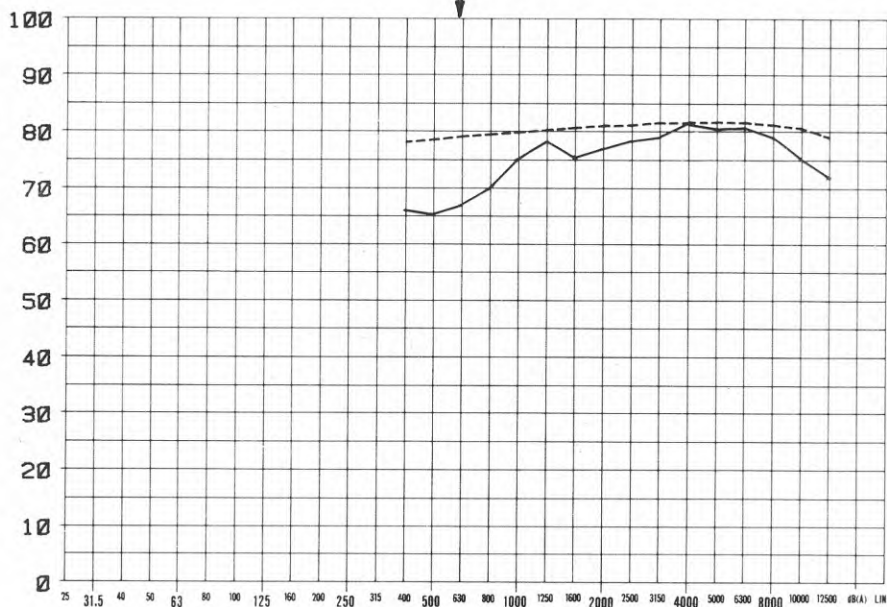
Hål Ø19 c/c 50

— Uppmätt

- - - Beräknad

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB

$f_{cx}, f_{cy}$



Frekvens, Hz

Modellbjälklag H4

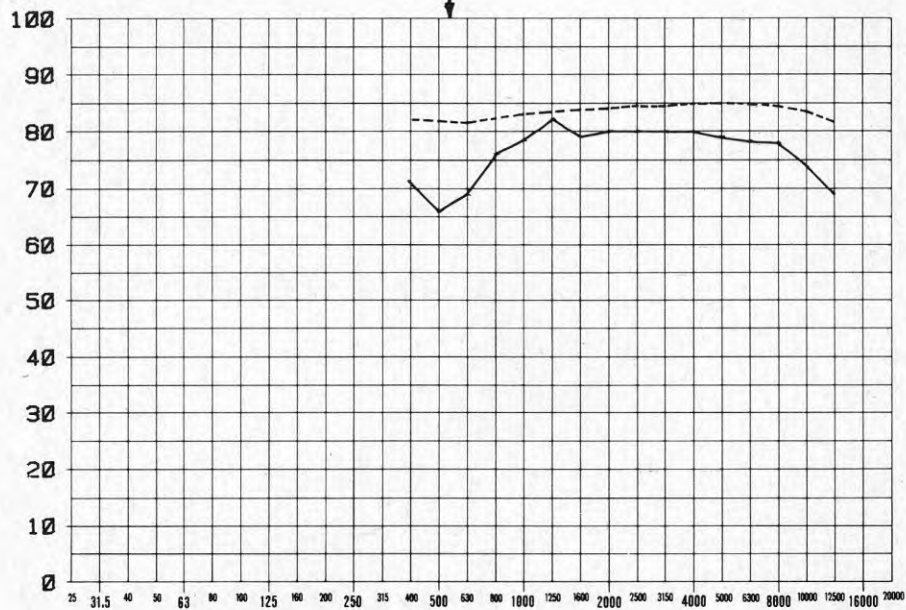


Hål Ø28 c/c 35

— Uppmätt  
- - - Beräknad

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$   
dB

$f_{cx}, f_{cy}$



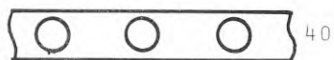
Frekvens, Hz

INGEMANSSONS  
INGENJÖRSBYRÅ AB

GÖTEBORG  
STOCKHOLM MALMÖ  
ÖRNSKÖLDSVIK

Figur 24

Modellbjälklag H5



Hål Ø28 c/c 80

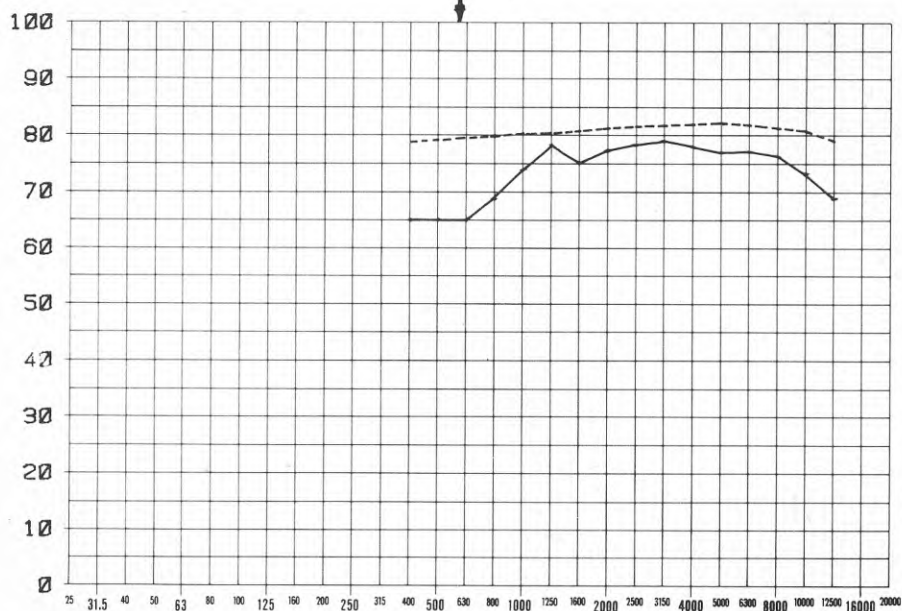
— Uppmätt

- - - Beräknad

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$

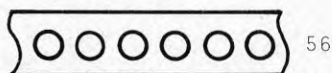
dB

$f_{cx}, f_{cy}$



Frekvens, Hz

Modellbjälklag H6



Hål Ø23 c/c 37

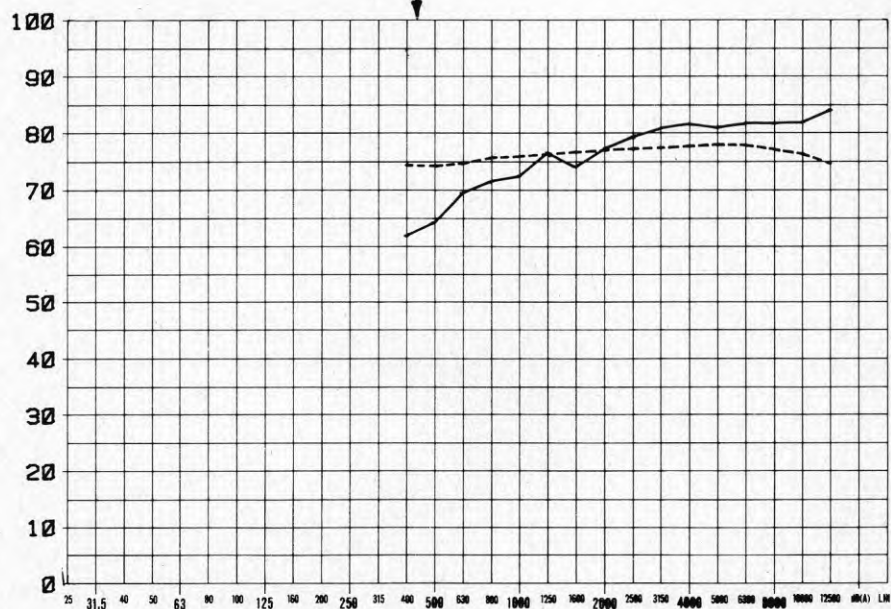
— Uppmätt

- - - Beräknad

Stegljudsnivå  $L_{0,63}$

dB

$f_{cx}, f_{cy}$

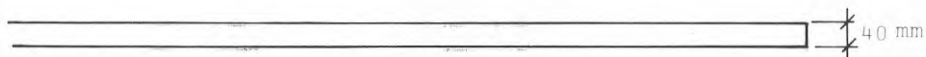
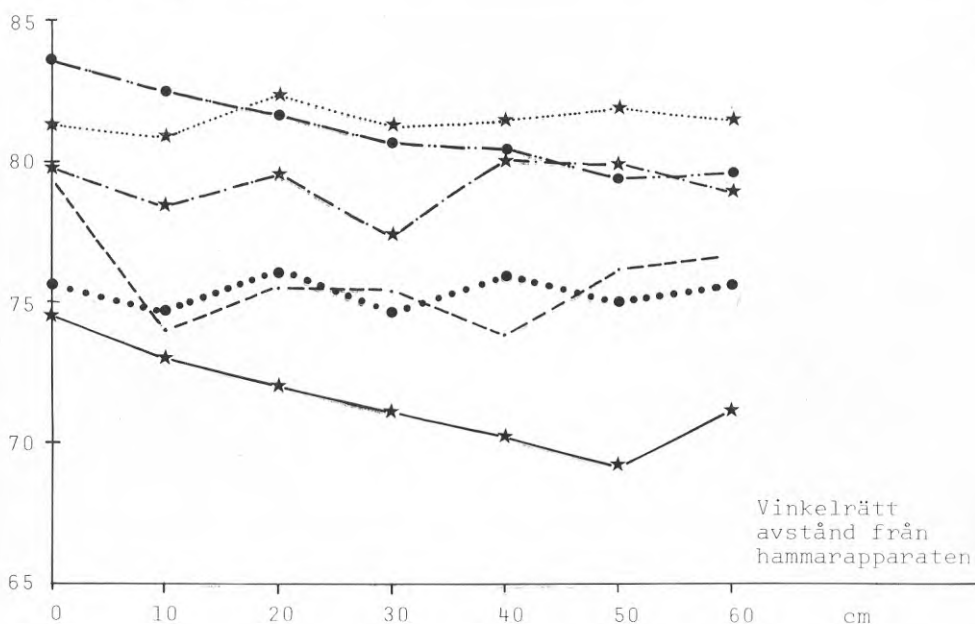


Frekvens, Hz



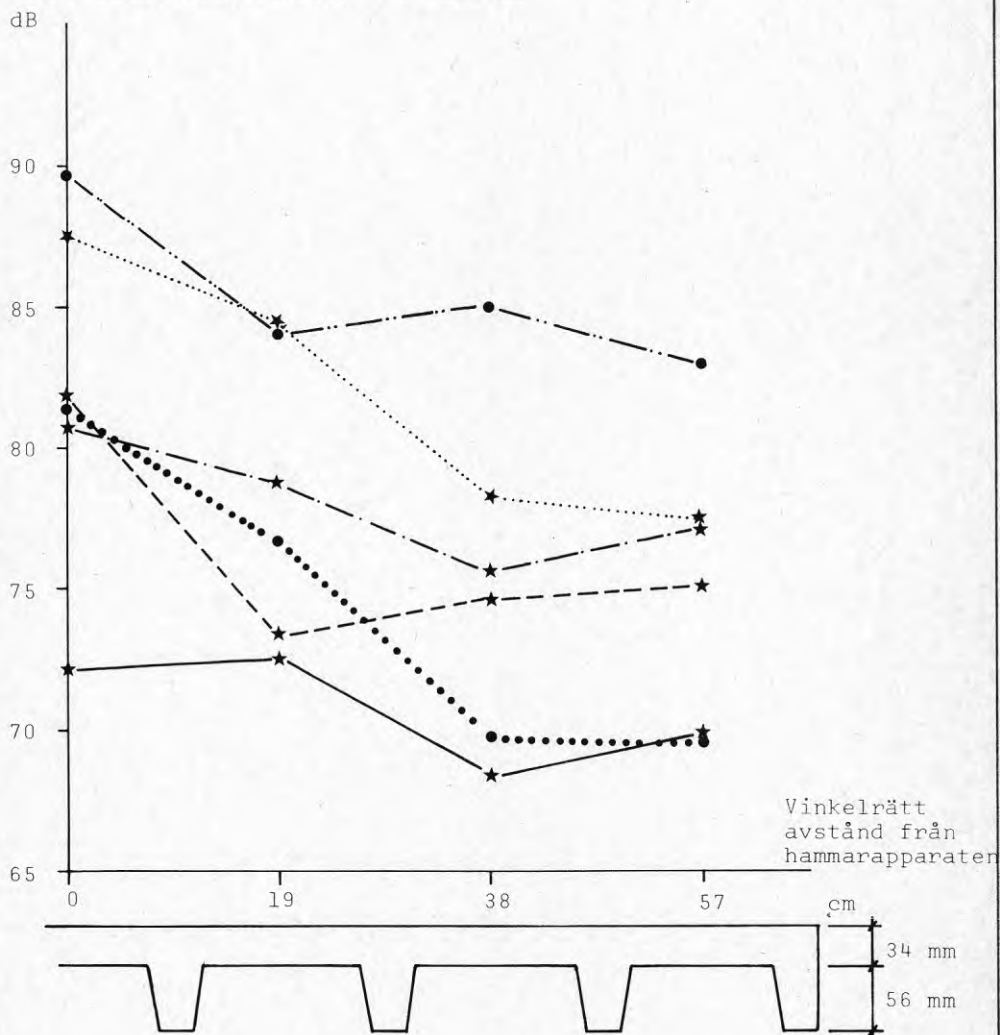
Utbredningsdämpning i modellbjälklag P2, fritt upplagt.

Vibrationshastighetsnivå i oktavband  
dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s



Utbredningsdämpning i modellbjälklag T8, fritt upplagt

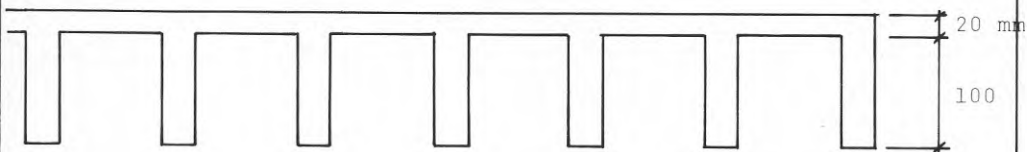
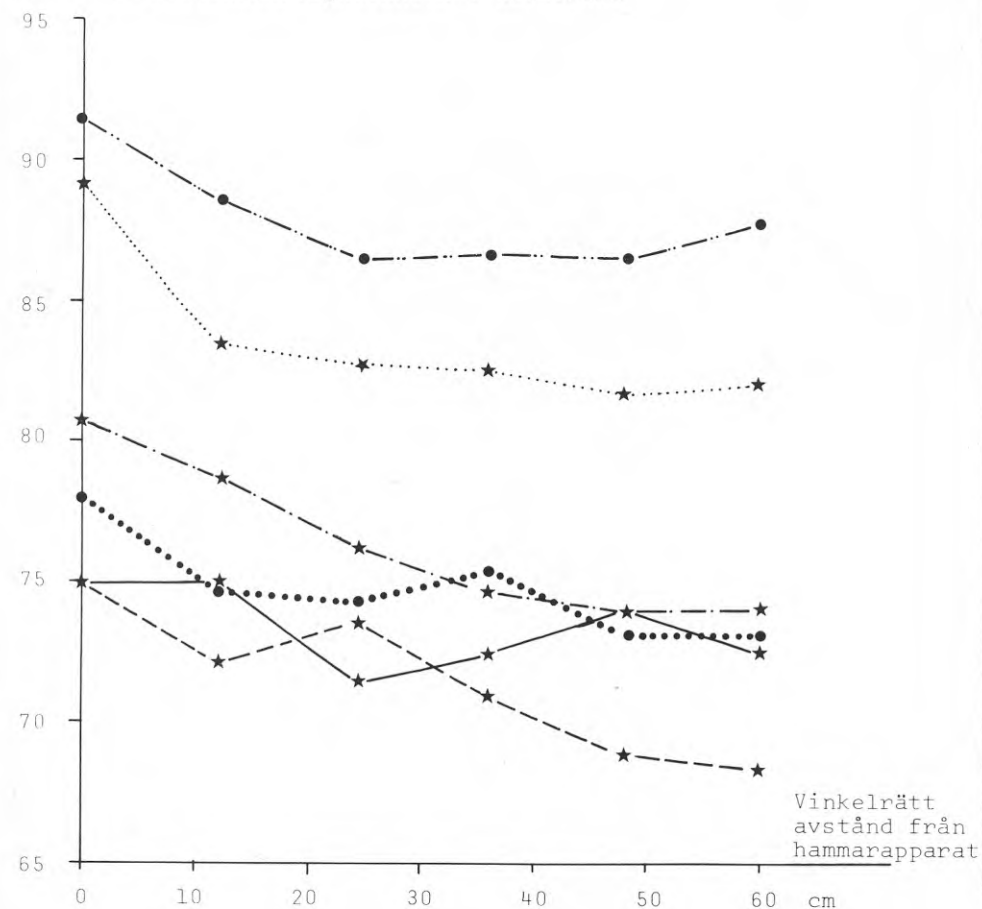
Vibrationshastighetsnivå i oktavband



Första subpanelresonans vid  $f_{1lp} = 2200$  Hz ( $q=1,6$ )

Utbredningsdämpning i modellbjälklag T9, fritt upplagt

Vibrationshastighetsnivå i oktavband

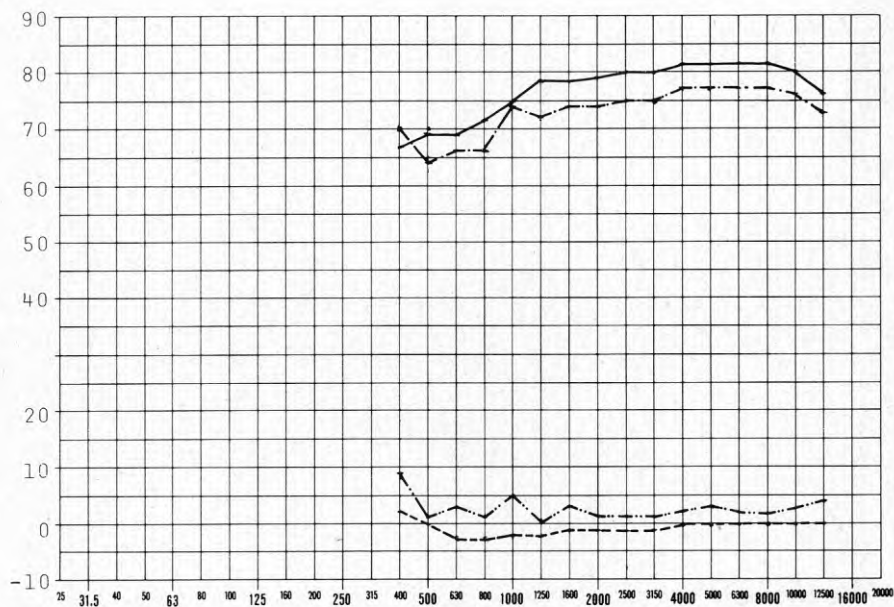


Första subpanelresonans vid  $f_{1lp} = 2800$  Hz ( $q=1,6$ )

Strålningsdämpning hos modellbjälklag P2

- Uppmätt stegljudsnivå  $L_{0,63}$
- · - · - Vibrationshastighetsnivå rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s, uppmätt medelvärde av 7 positioner
- · - · - Uppmätt strålningsdämpning
- - - - Beräknad strålningsdämpning

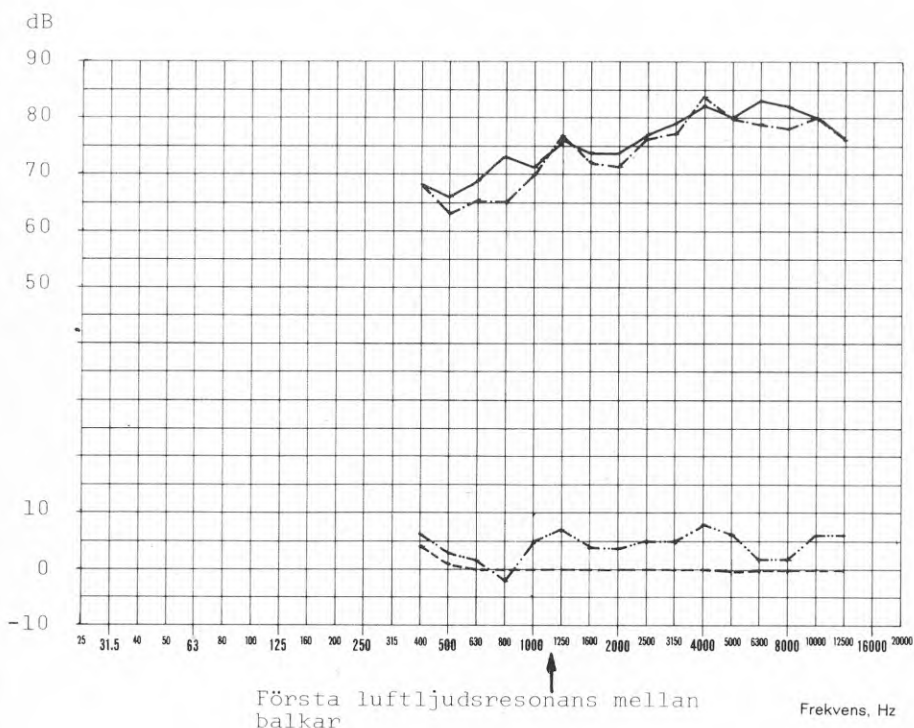
dB



Frekvens, Hz

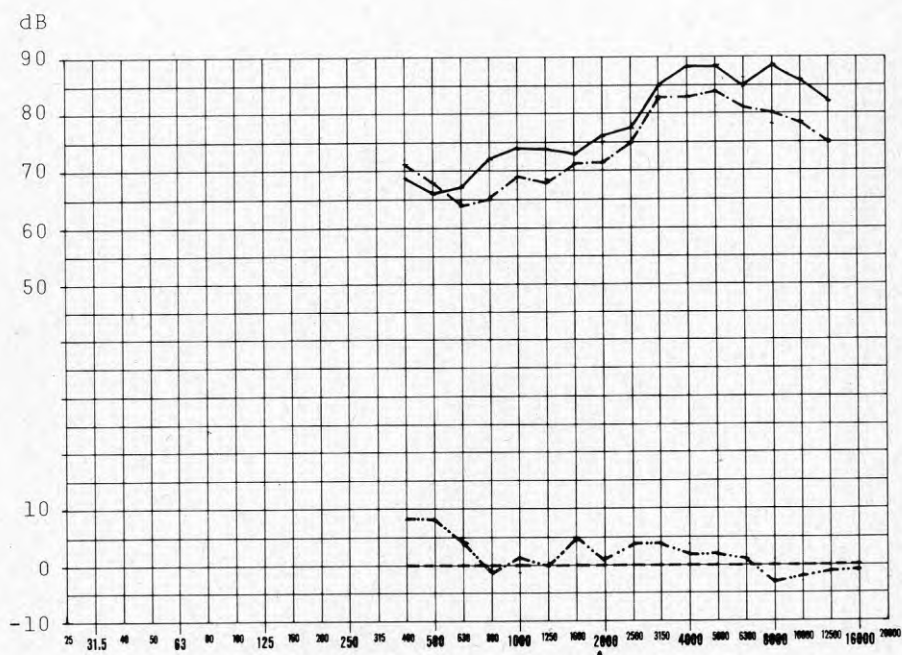
Strålningsdämpning hos modellbjälklag T8

- Uppmätt stegljudsnivå  $L_{0,63}$
- · - · - Uppmätt vibrationshastighetsnivå rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s,  
medelvärde av 7 accelerometerpositioner
- · - · - Uppmätt strålningsdämpning
- Beräknad strålningsdämpning



Strålningsdämpning hos modellbjälklag T9

- Uppmätt stegljudsnivå  $L_{0,63}$
- - - - - Uppmätt vibrationshastighetsnivå rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s,  
medelvärde av 7 accelerometerpositioner
- - - - - Uppmätt strålningsdämpning
- Beräknad strålningsdämpning



Första luftljudsresonans mellan balkar

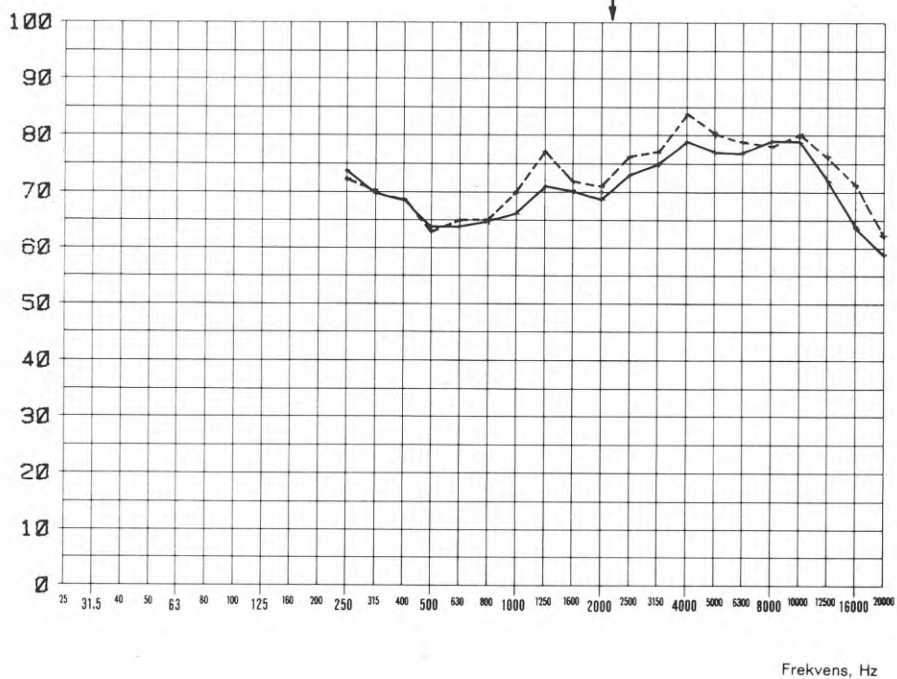
Frekvens, Hz

Balkvibrationer hos modellbjälklag T8

— Vertikala vibrationer hos balkar, medelvärde av  
3 positioner

- - - Vertikala vibrationer hos subpaneler, medelvärde av  
4 positioner

Vibrationshastighetsnivå  
dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s





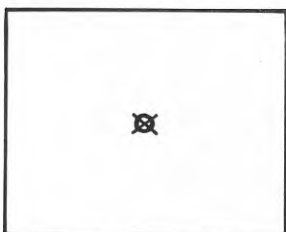
Balkvibrationer hos modellbjälklag T9

- Vertikala vibrationer hos balkar, medelvärde av 6 positioner
- Vertikala vibrationer hos subpaneler, medelvärde av 8 x 3 positioner

Vibrationshastighetsnivå  
dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s

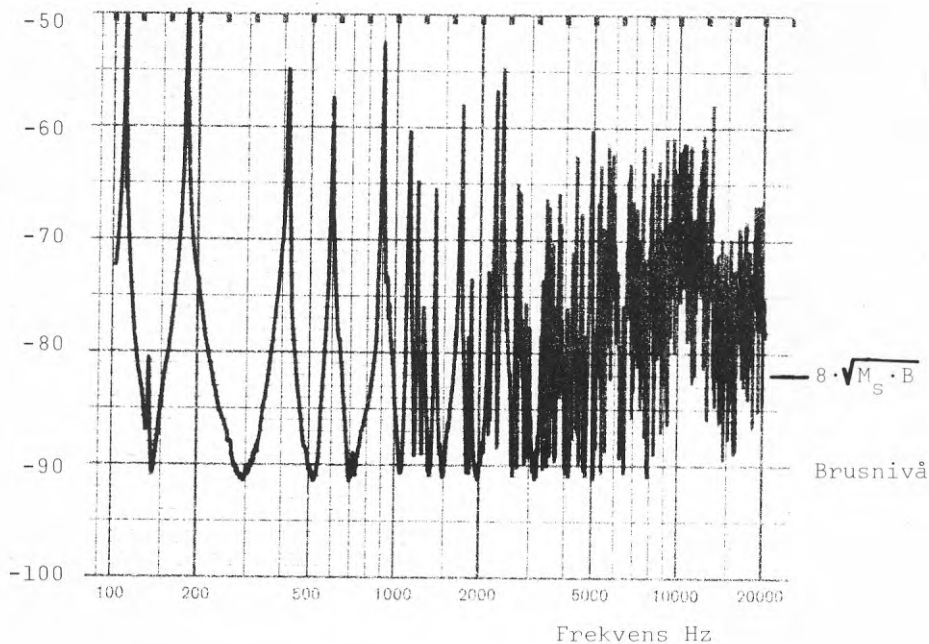


Punktadmittans hos modellbjälklag P2, fritt upplagt på  
10 cm skumplast.

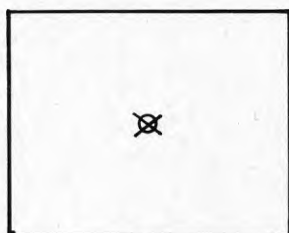


$20 \cdot \log v/f$

dB rel. 1 m/Ns

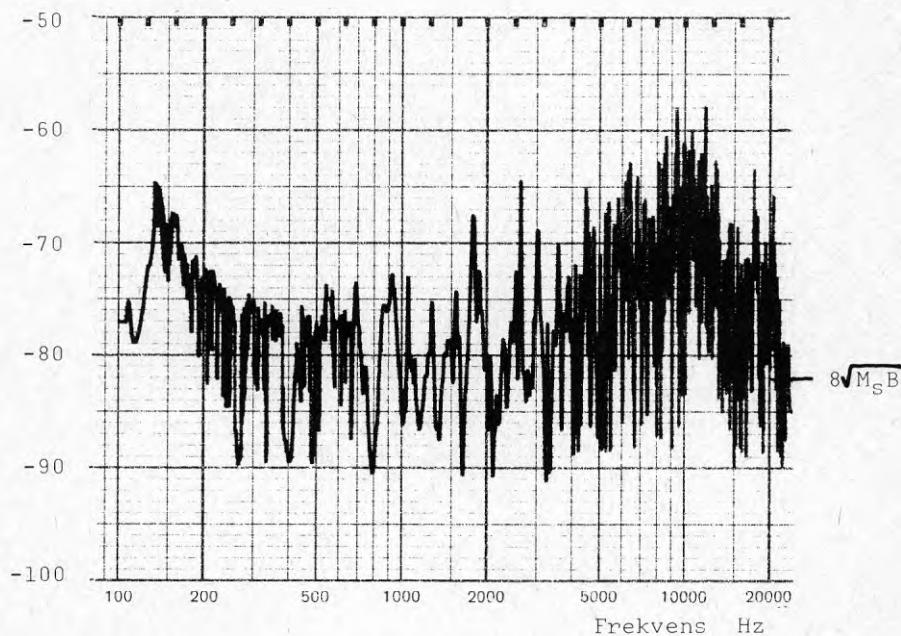


Punktadmittans hos bjälklag P2, fritt upplagt på  
10 cm skumplast, belastat runt randen.

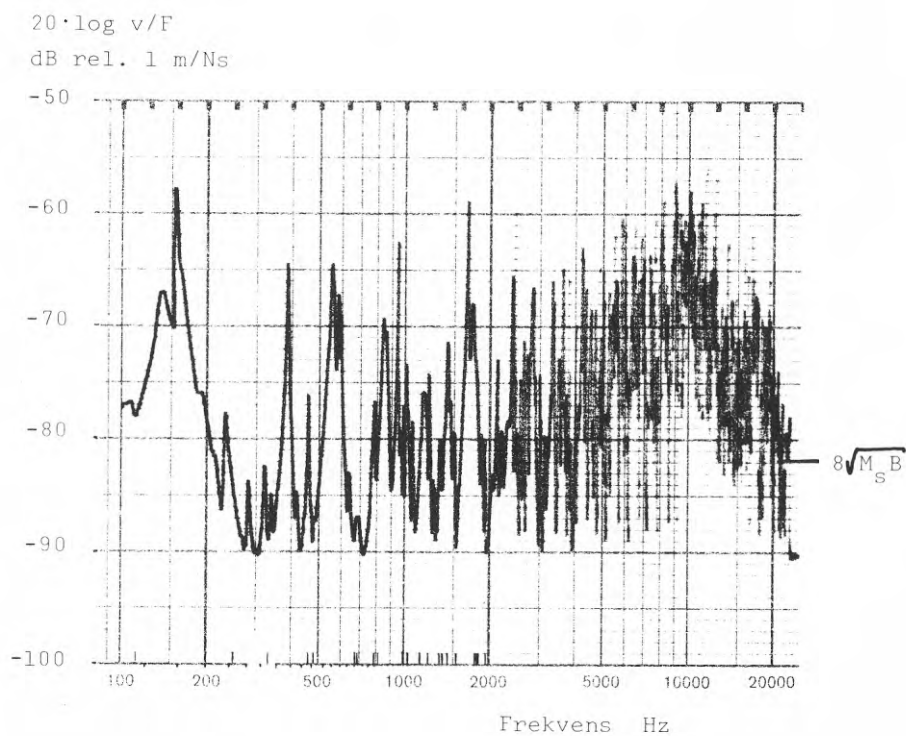
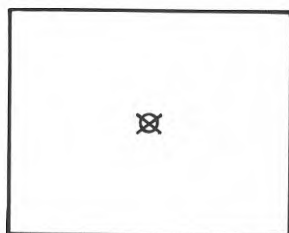


$20 \cdot \log v/F$

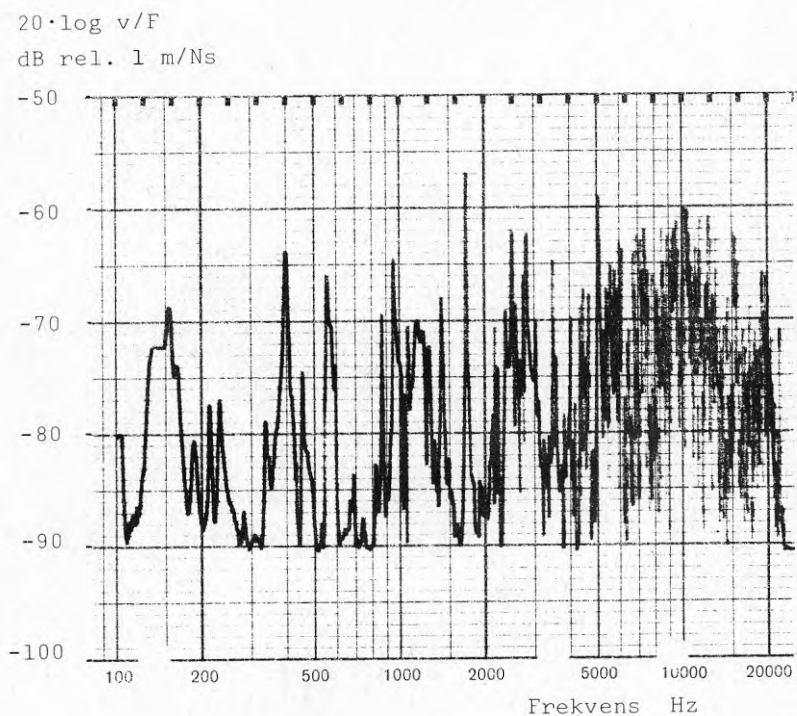
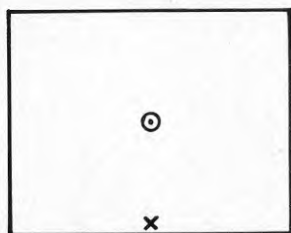
dB rel. 1 m/Ns



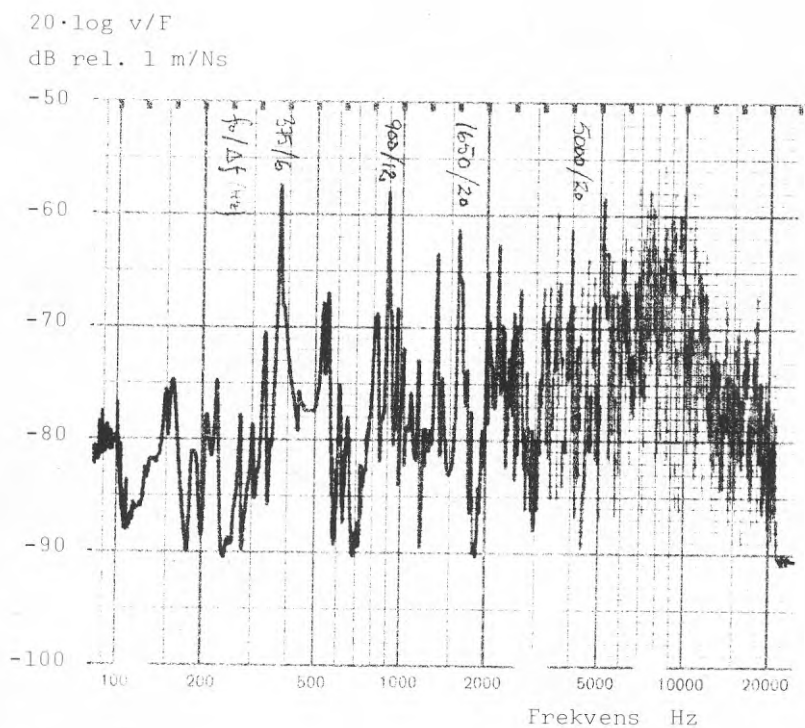
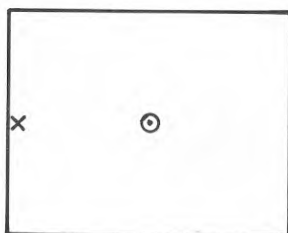
Punktadmittans hos bjälklag P2, fritt upplagt på  
modellmättrumstaket.



Överföringsadmittans från mitten till randen hos  
modellbjälklag P2, fritt upplagt på modellmättrumstaket.

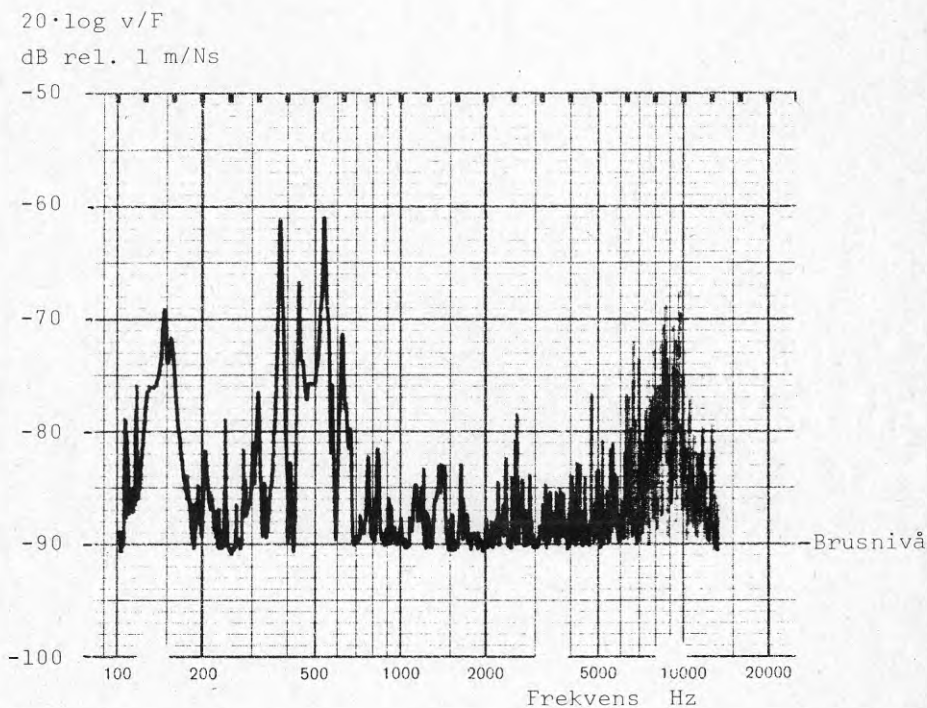
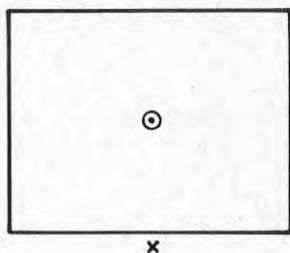


Överföringsadmittans från mitten till randen hos modell-  
bjälklag P2, fritt upplagt på modellmättrumstaket.



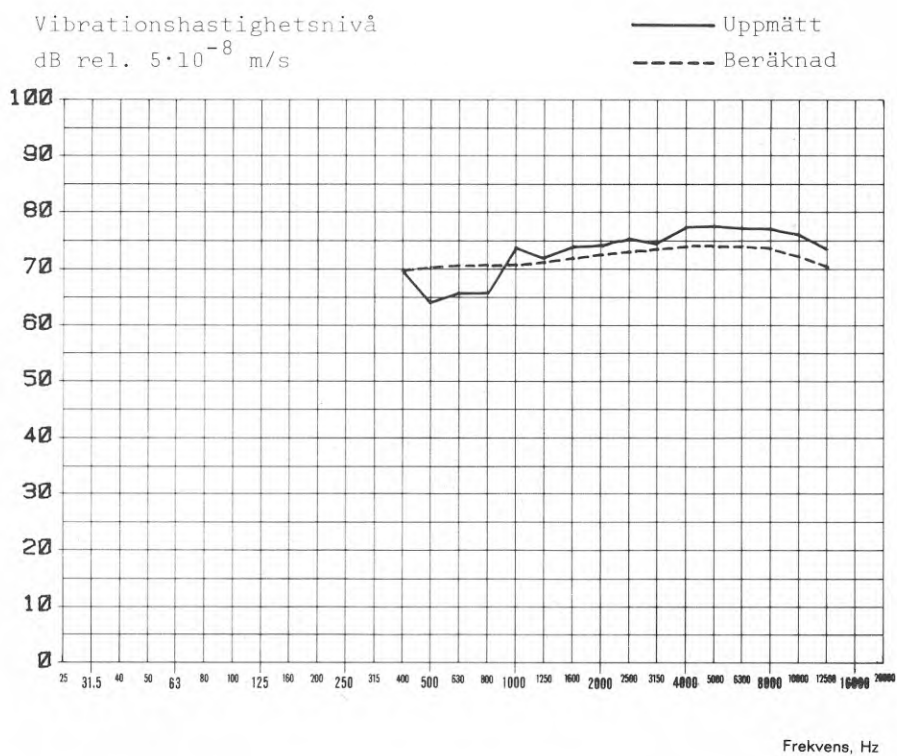


Överföringsadmittans från modellbjälklag P2 till  
modellmättrumstaket. Bjälklaget fritt upplagt direkt på taket.





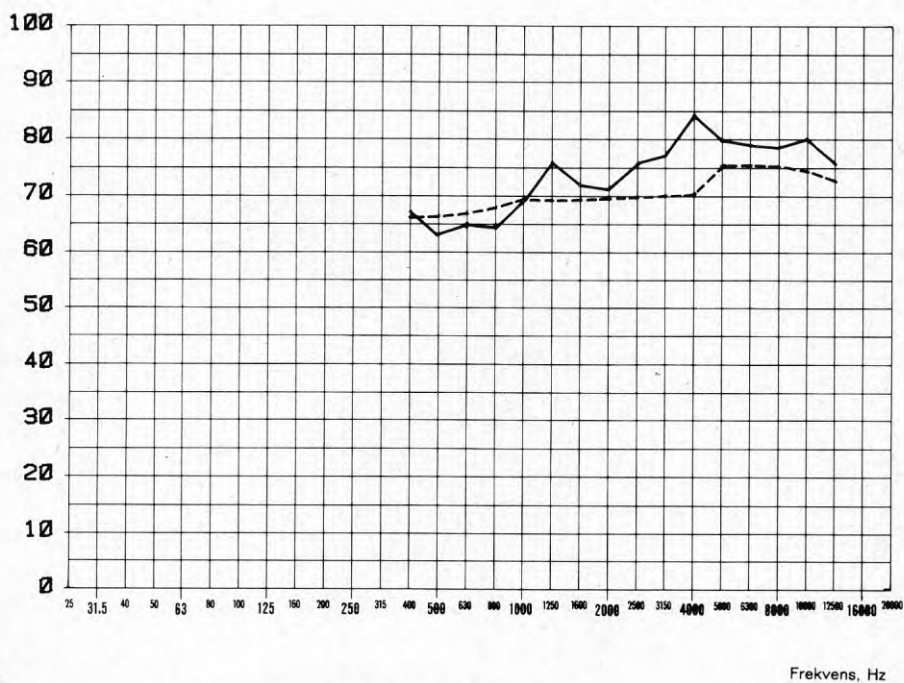
Vibrationer i modellbjälklag P2



Vibrationer i modellbjälklag T8

Vibrationshastighetsnivå  
dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s

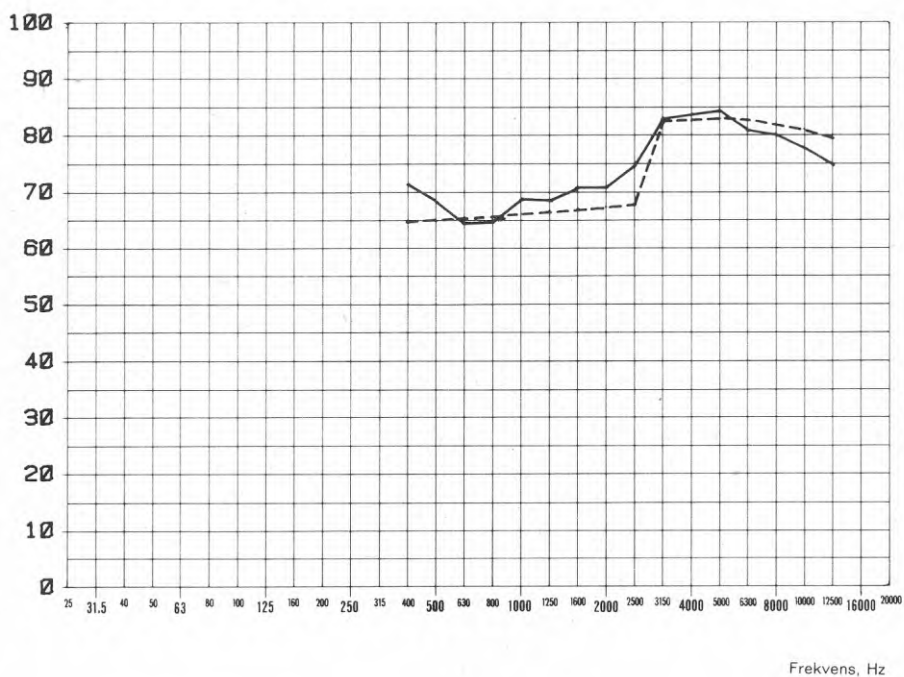
— Uppmätt  
- - - Beräknad,  $q=3,1$



Vibrationer i modellbjälklag T9

Vibrationshastighetsnivå  
dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s

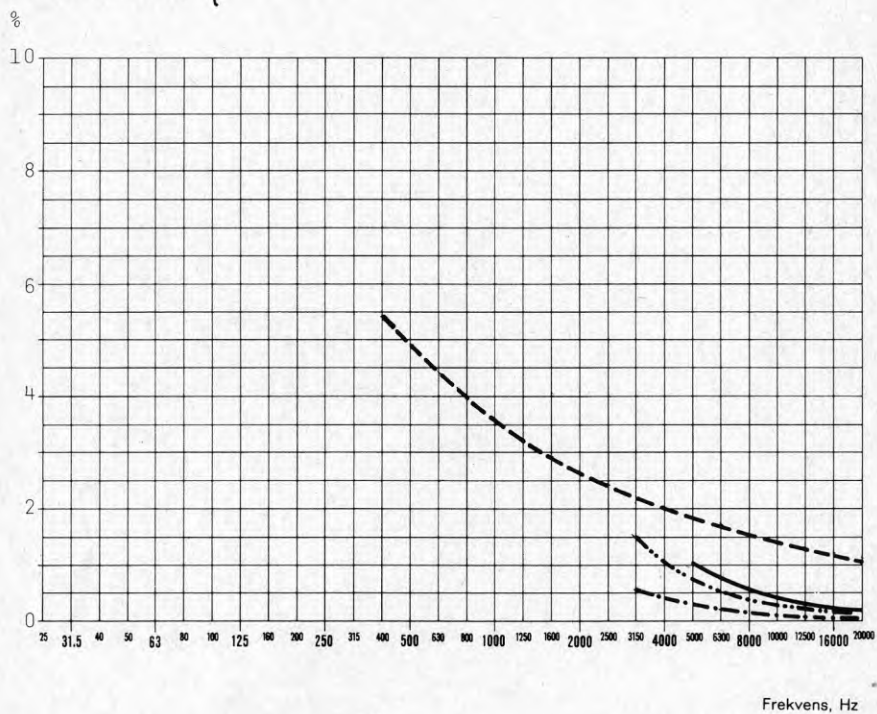
— Uppmätt  
- - - Beräknad,  $q=1,6$



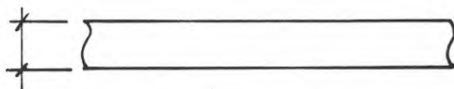
Förlustfaktorer för modell(ribb-)bjälklag

- Ur ekv. 5.1 och 5.2, använd i datorprogrammet  
för samtliga modellbjälklag.
- T8 ————— }  
T9 - - - - - } Ur ekv. 3.18 för subpaneler, exkl.inre  
T10 - - - - - } förlustfaktorn  $\eta_i$

Förlustfaktor  $\eta$



Fullskalebjälklag , planparallellt



— Uppmätt stegljudsnivå i fält, medelvärde ur 5 mätningar på 16 cm råbjälklag.

----- Beräknad stegljudsnivå

E-modul  $2,6 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>

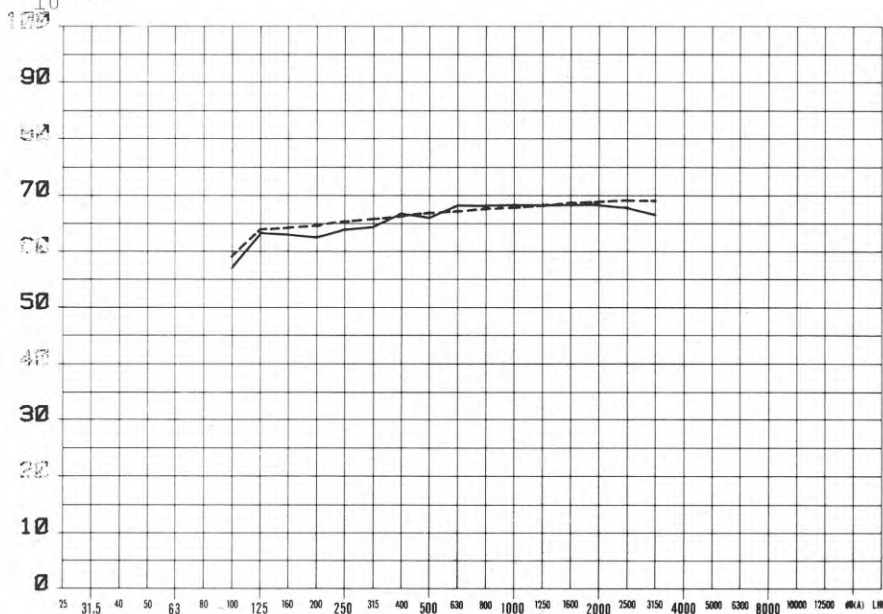
Täthet 2400 kg/m<sup>3</sup>

Förlustfaktor  $\eta_r = 5\%$  vid 100 Hz,  $\eta_i = 0,5\%$

$f_0 = 10$  kHz

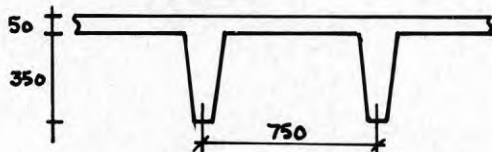
Stegljudsnivå

$L_{10}$  dB



Frekvens, Hz

Fullskalebjälklag, TT



— Uppmätt stegljudsnivå i fält

----- Beräknad stegljudsnivå

E-modul  $2,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

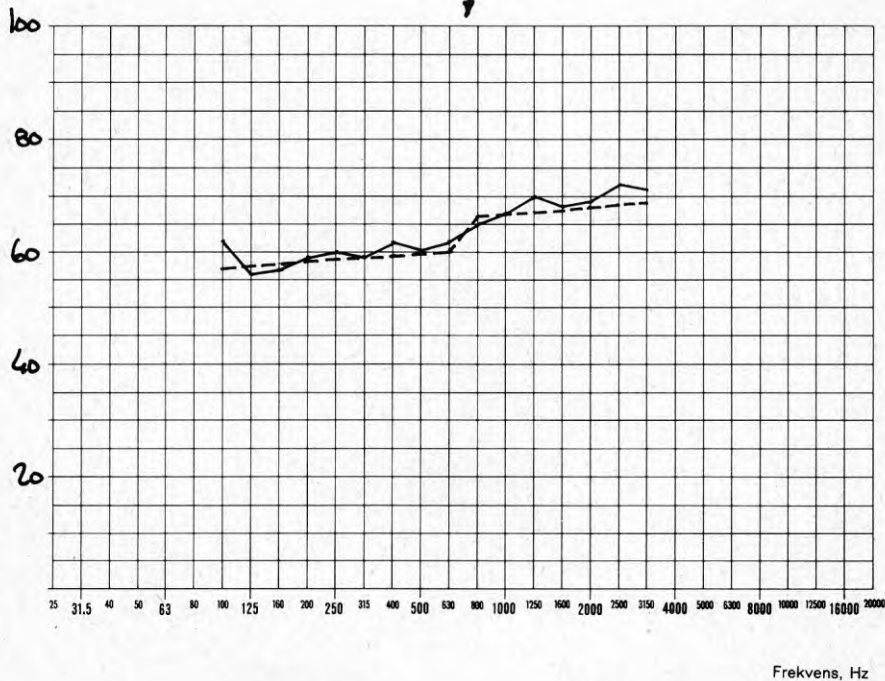
Täthet  $2400 \text{ kg/m}^3$

Förlustfaktor  $\eta_r = 5\%$  vid 100 Hz,  $\eta_i = 0,5\%$

$f_0 = 10 \text{ kHz}$

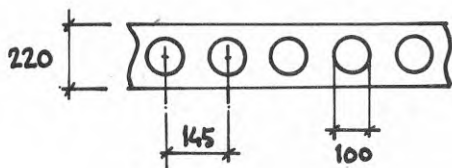
$L_{10} \text{ dB}$

$f_{H,q} = 1.6$



Frekvens, Hz

Fullskalebjälklag, hål-



— Uppmätt stegljudsnivå i fält

----- Beräknad stegljudsnivå

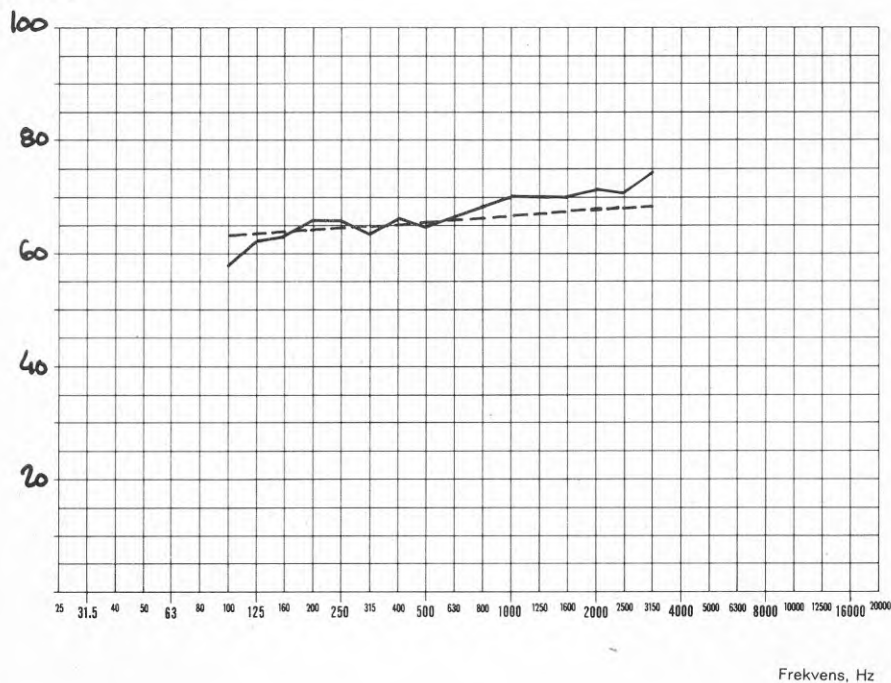
E-modul  $3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Täthet  $2400 \text{ kg/m}^3$

Förlustfaktor  $\eta_r = 3\%$  vid 100 Hz,  $\eta_i = 0,5\%$

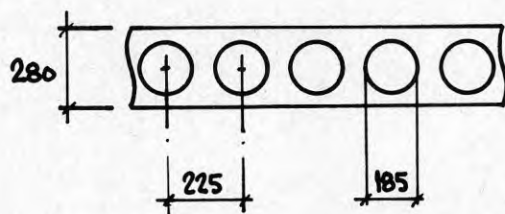
$f_0 = 10 \text{ kHz}$

$L_{10} \text{ dB}$





Fullskalebjälklag, hål-

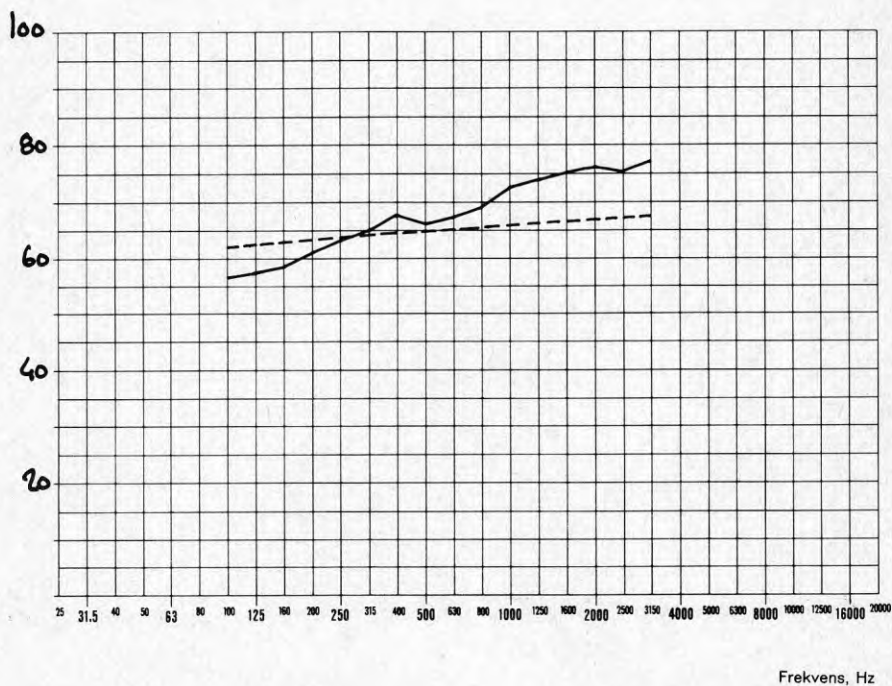


— Uppmätt stegljudsnivå i fält

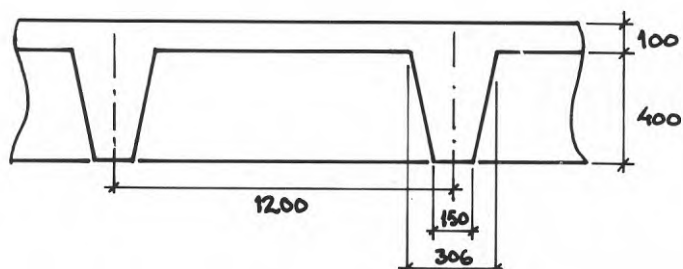
----- Beräknad stegljudsnivå

Data som föreg.

$L_{10}$  dB



Fullskalebjälklag, kupol-



— Uppmätt stegljudsnivå i fält

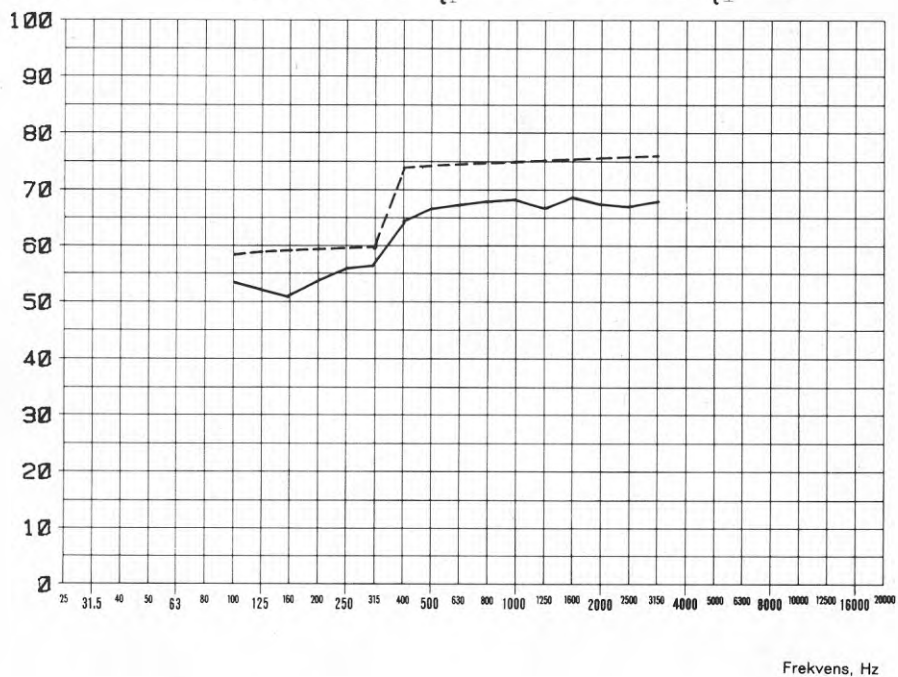
----- Beräknad stegljudsnivå,  $q=1,6$  för subpanel

E-modul  $3 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>

Täthet 2400 kg/m<sup>3</sup>

$L_{10}$  dB

Förlustfaktor  $\eta_r = 3\%$  vid 100 Hz,  $\eta_i = 0,5\%$



Modell kontra fullskala, skalenlig geometri

Olikheter i byggnadsmaterialens E-modul och täthet gör att modellmätresultatet ej utan omräkning kan appliceras i fullskala.

— Betong i fullskala

E-modul  $2,6 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$

Täthet  $2400 \text{ kg/m}^3$

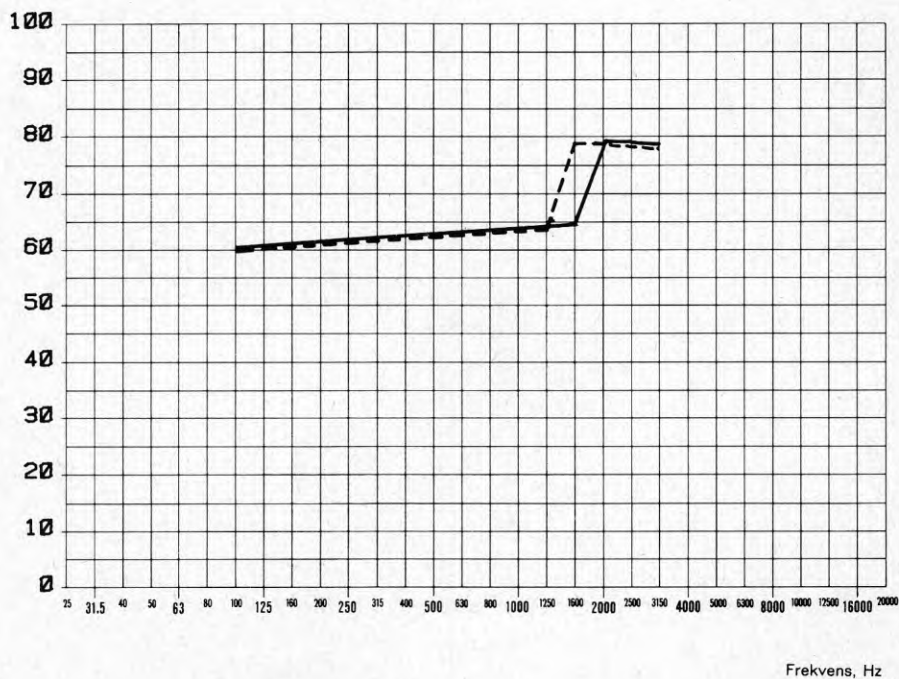
----- Gipsmodell av TT-bjälklag, överfört till fullskala

E-modul  $7,7 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

Täthet  $1380 \text{ kg/m}^3$

Stegljudsnivå  $L_{10} = L_{0,63} - 12 \text{ dB}$

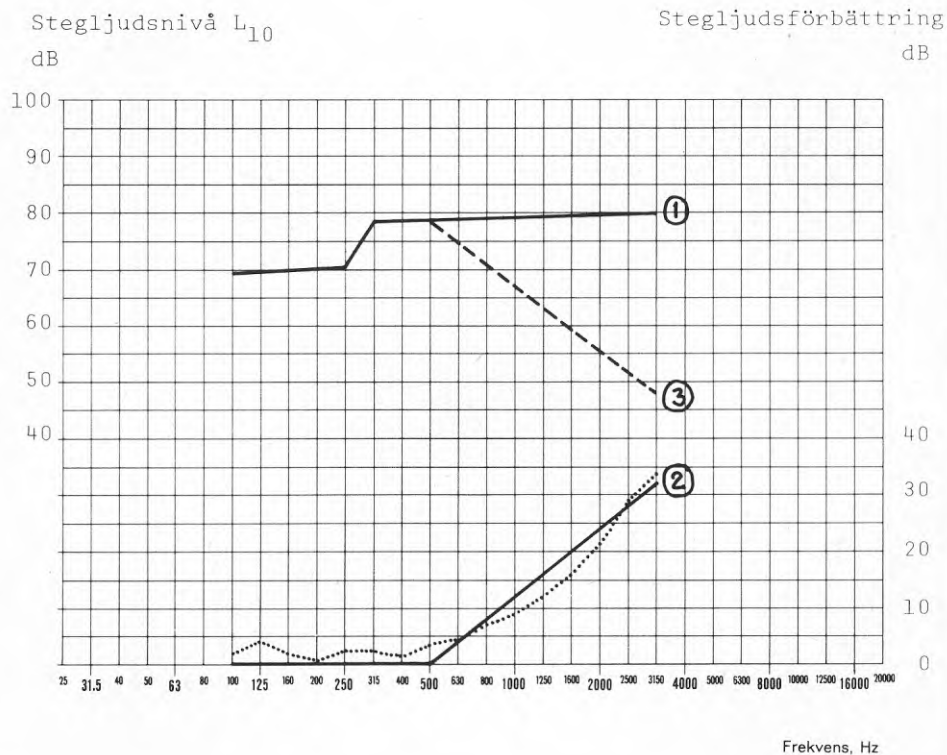
dB



Beräkningsmodell för mjuka golvbeläggningar på tunga råbjälklag

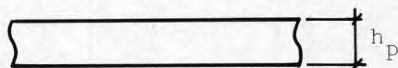
- ① — Beräknad råbjälklagskurva
- ② — Approximativ stegljudsförbättringskurva för mjuk matta (verkliga kurvan prickad, jfr fig.66)
- ③ ---- Resulterande stegljudskurva för vilken index för stegljudsnivå  $L_1$  beräknas.

$$3 = 1 - 2$$

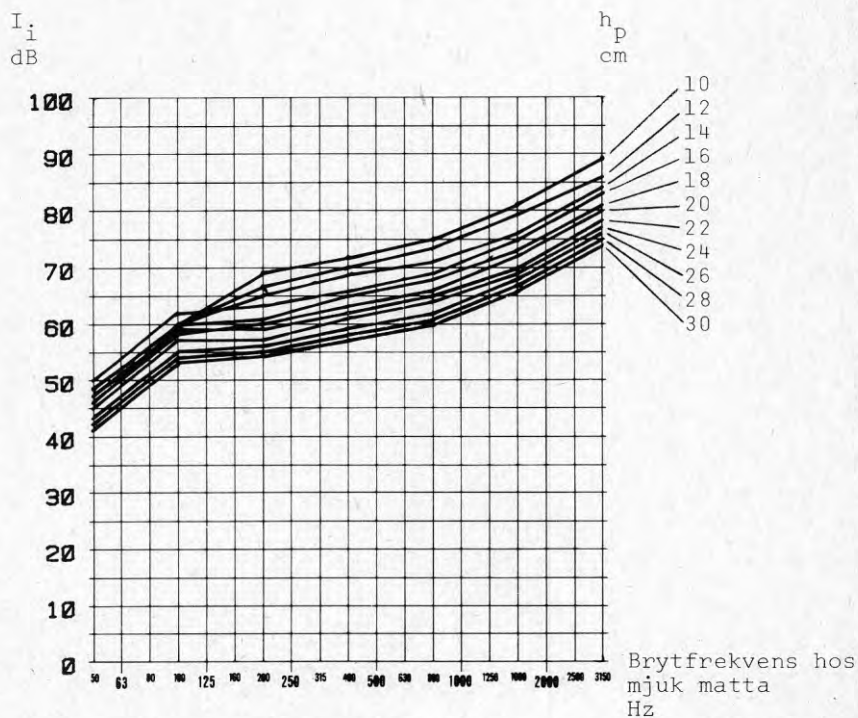


Predikterat index för stegljudsnivå:

Planparallella betongbjälklag

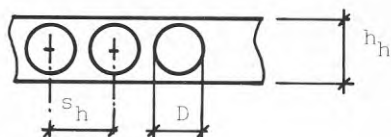


$h_p$  varierande



Predikterat index för stegljudsnivå:

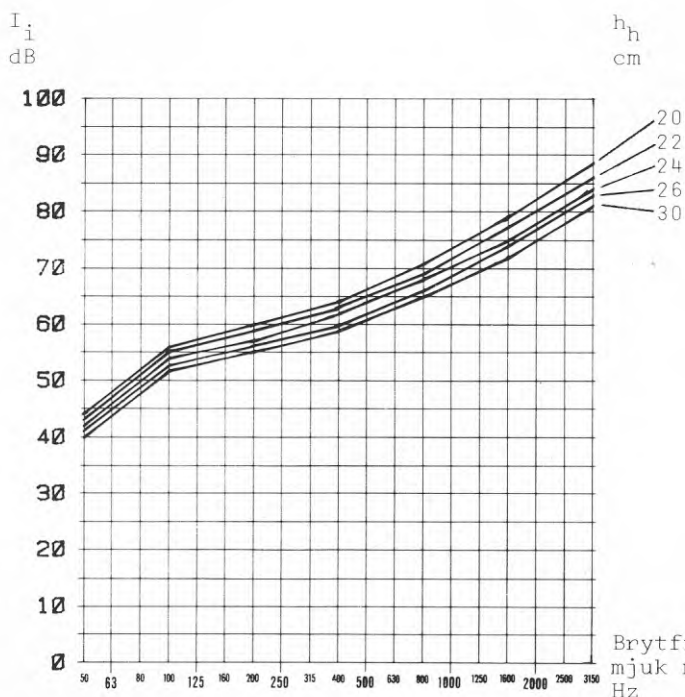
Hålbjälklag i betong



$h_h$  varierande

$s_h = 13,9 \text{ cm}$

$D = 10,8 \text{ cm}$





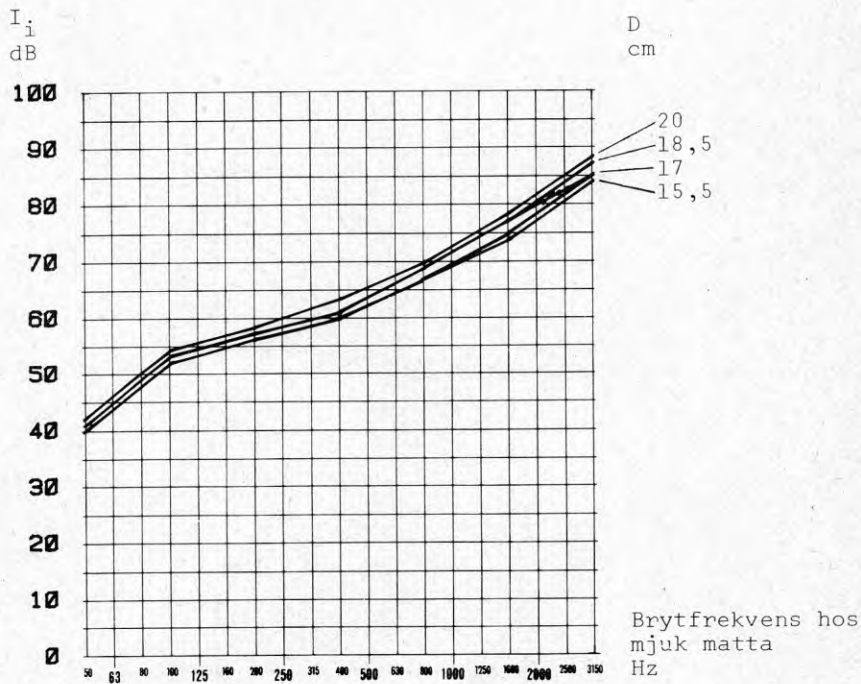
Predikterat index för stegljudsnivå:

Hålbjälklag i betong

$h_h = 28 \text{ cm}$

$s_h = 22 \text{ cm}$

D. varierande





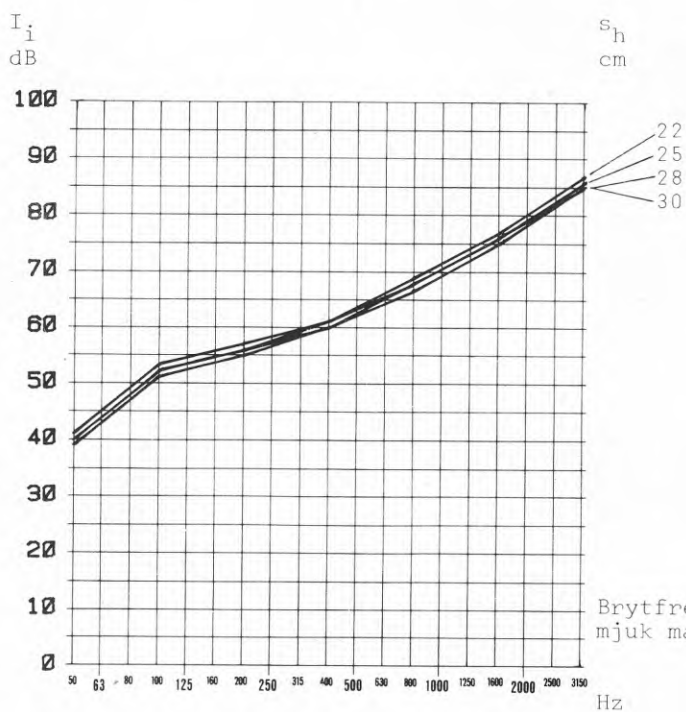
Predikterat index för stegljudsnivå:

Hålbjälklag i betong

$$h_h = 28 \text{ cm}$$

$$s_h = \text{varierande}$$

$$D = 18,5 \text{ cm}$$



Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

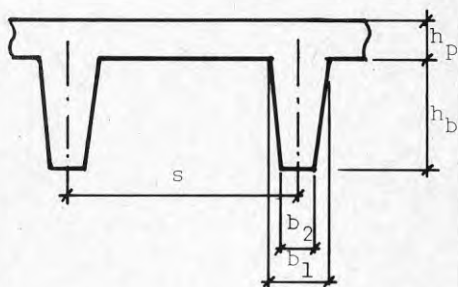
$$h_p = 11 \text{ cm}$$

$$h_b = 35 \text{ cm}$$

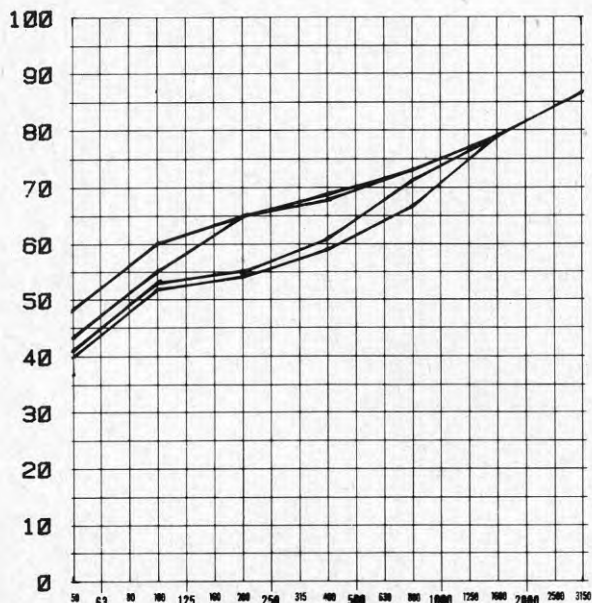
s varierande

$$b_1 = 23 \text{ cm}$$

$$b_2 = 17 \text{ cm}$$



$I_i$   
dB



s  
cm

150  
120  
75  
60

Brytfrekvens hos  
mjuk matta  
Hz

Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

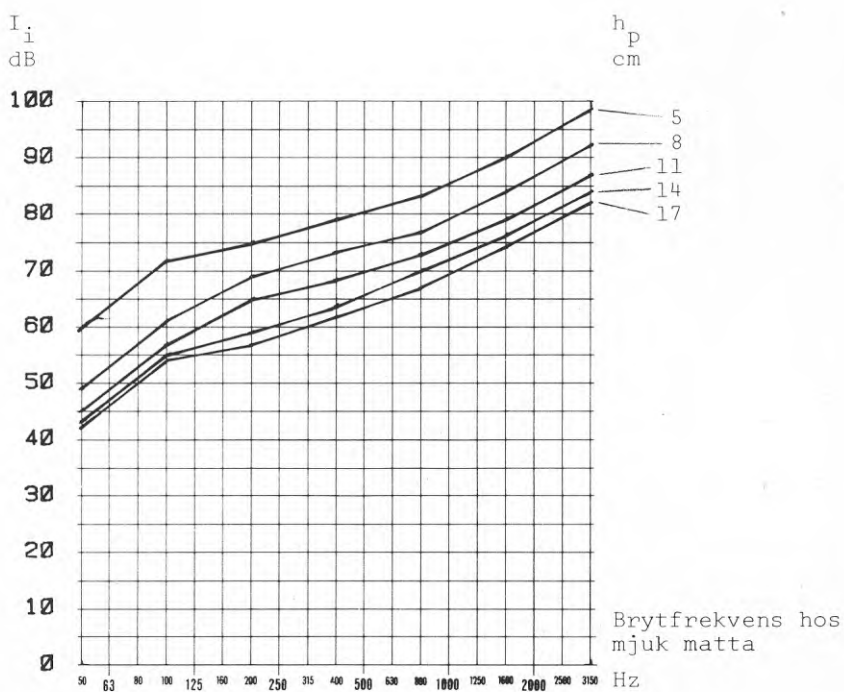
$h_p$  varierande

$h_b = 25$  cm

$s = 120$  cm

$b_1 = 23$  cm

$b_2 = 18,8$  cm



Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

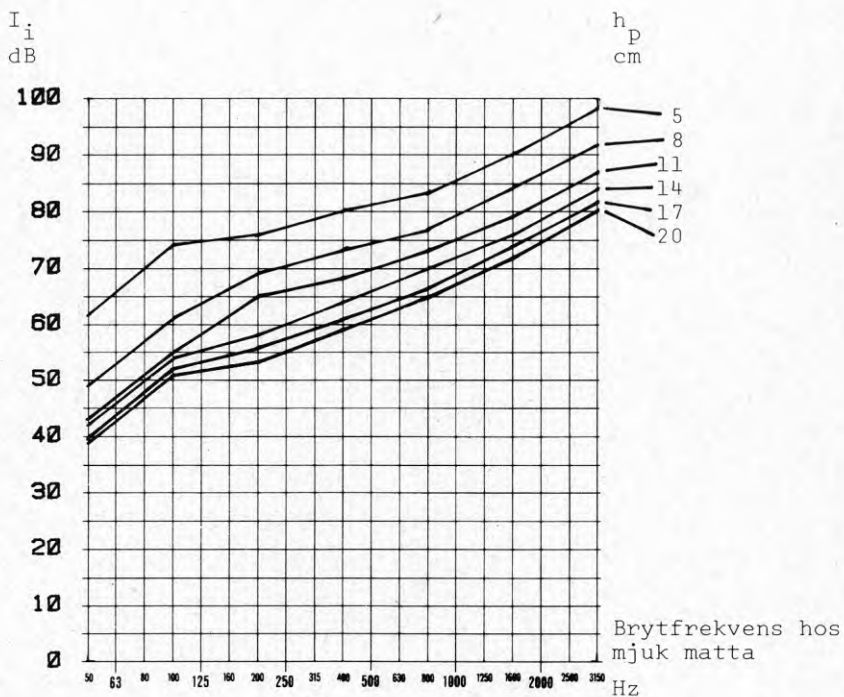
$h_p$  varierande

$h_b = 35$  cm

$s = 120$  cm

$b_1 = 23$  cm

$b_2 = 17$  cm



Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

$$h_p = 11 \text{ cm}$$

$h_b$  varierande

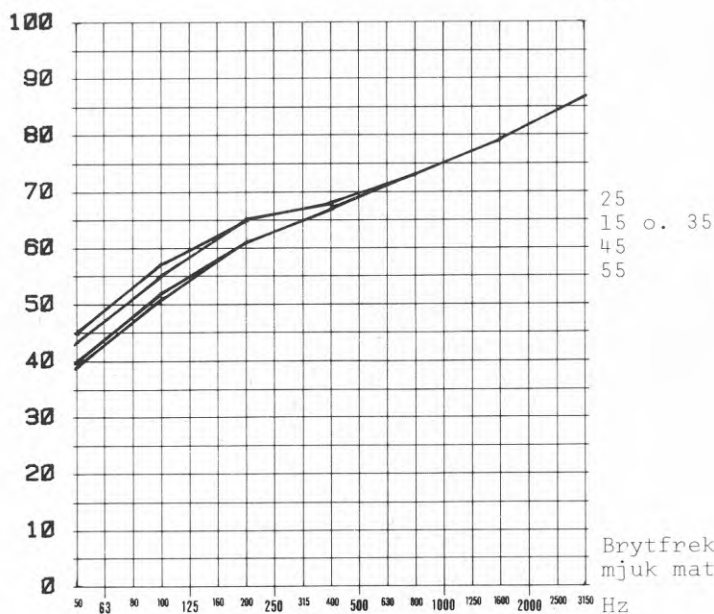
$$s = 120 \text{ cm}$$

$$b_1 = 23,0 / 23,0 / 23,0 / 27,5 / 27,5 \text{ cm}$$

$$b_2 = 20,6 / 18,8 / 17,0 / 21,4 / 20,0 \text{ cm}$$

$I_i$   
dB

$h_b$   
cm



Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

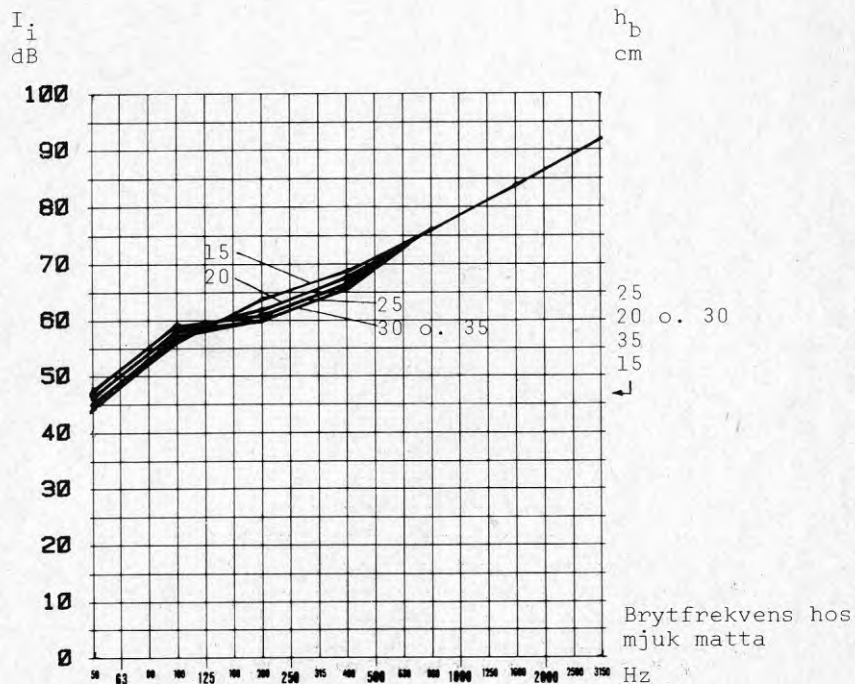
$$h_p = 8 \text{ cm}$$

$h_b$  varierande

$$s = 60 \text{ cm}$$

$$b_1 = 12 \text{ cm}$$

$$b_2 = 10 / 9,5 / 9 / 8,5 / 8 \text{ cm}$$



Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

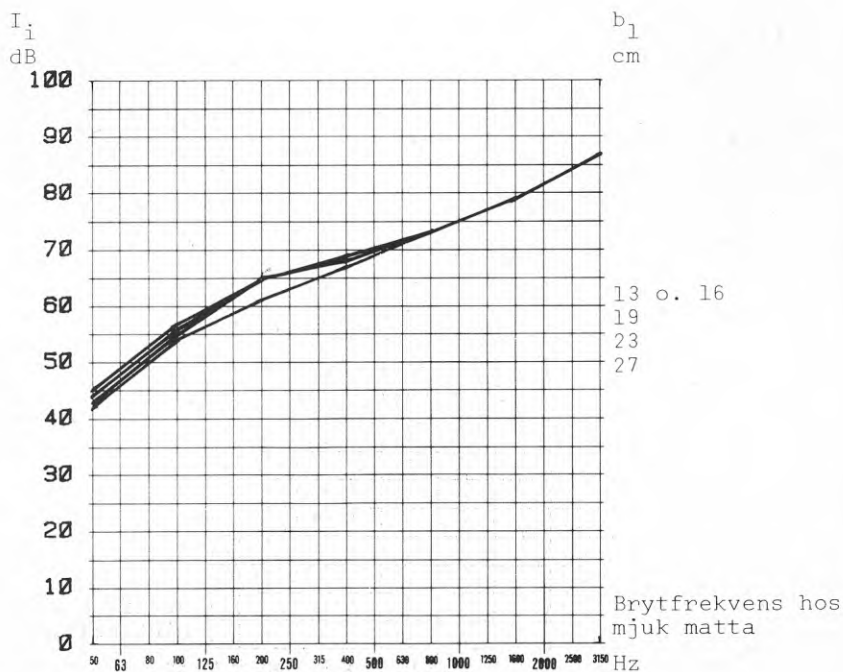
$$h_p = 11 \text{ cm}$$

$$h_b = 35 \text{ cm}$$

$$s = 120 \text{ cm}$$

$$b_1 = \text{varierande}$$

$$b_2 = 7 / 10 / 13 / 17 / 21 \text{ cm}$$





Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

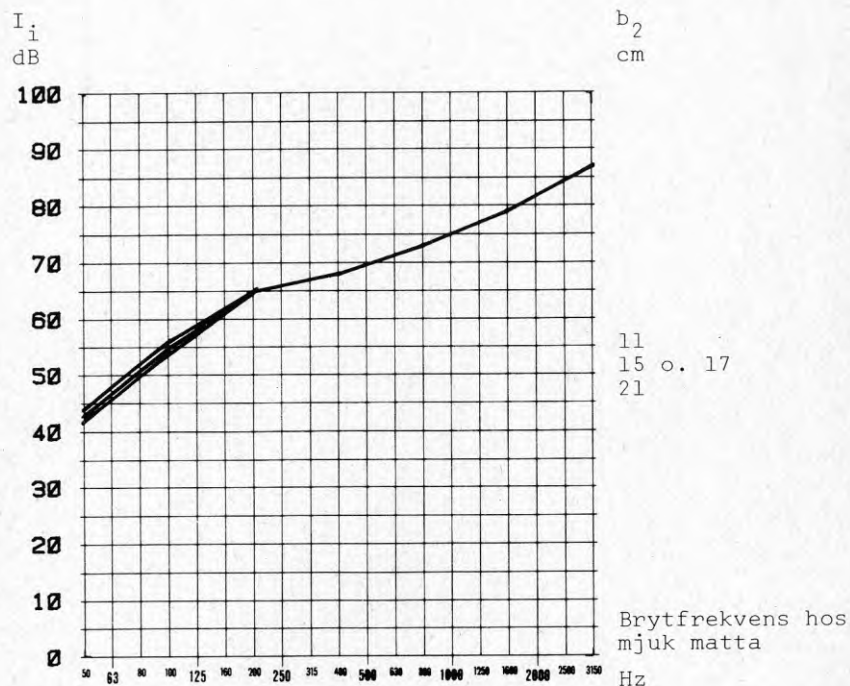
$$h_p = 11 \text{ cm}$$

$$h_b = 35 \text{ cm}$$

$$s = 120 \text{ cm}$$

$$b_1 = 23 \text{ cm}$$

$$b_2 \text{ varierande}$$



Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

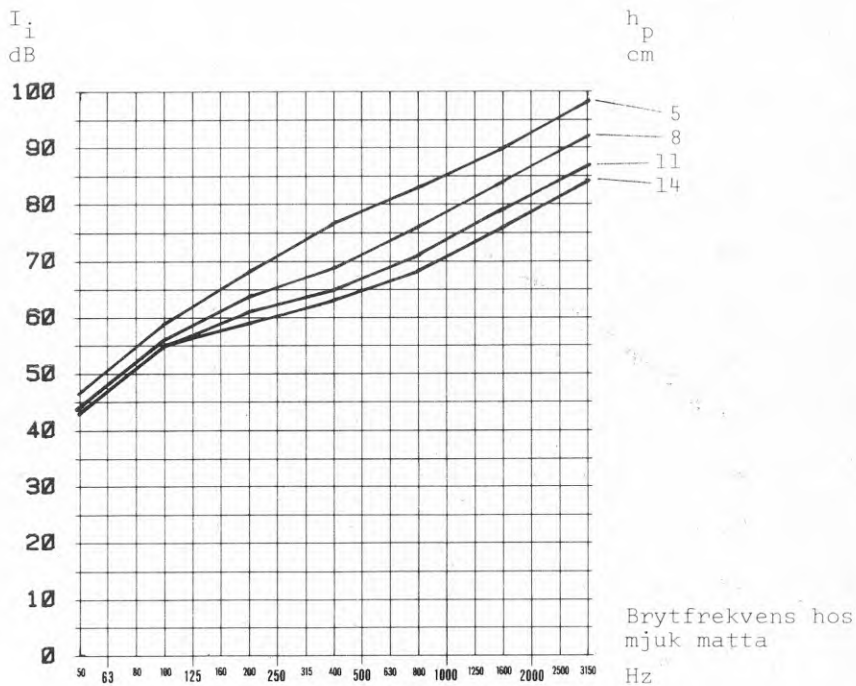
$h_p$  varierande

$h_b = 15 \text{ cm}$

$s = 60 \text{ cm}$

$b_1 = 12 \text{ cm}$

$b_2 = 10 \text{ cm}$



Predikterat index för stegljudsnivå:

TT-bjälklag i betong

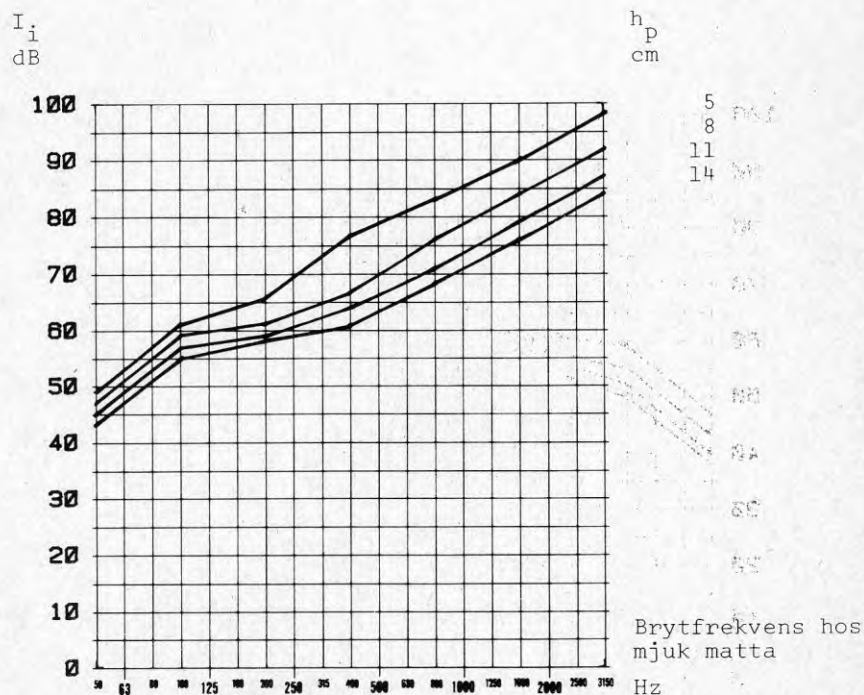
$h_p$  varierande

$h_b = 25 \text{ cm}$

$s = 60 \text{ cm}$

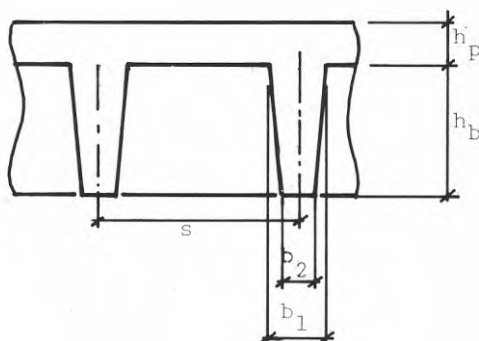
$b_1 = 12 \text{ cm}$

$b_2 = 9 \text{ cm}$



Predikerat index för stegljudsnivå:

Kupolbjälklag i betong



$$h_p = 11 \text{ cm}$$

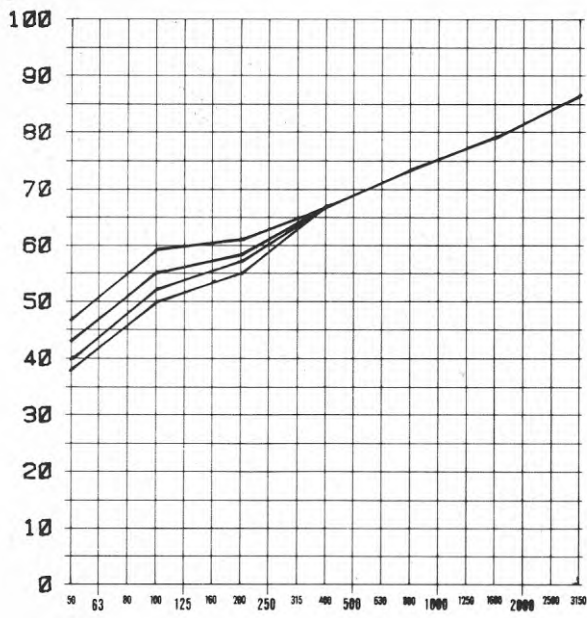
$h_b$  varierande

$$s = 120 \text{ cm}$$

$$b_1 = 19 / 21 / 23 / 25 \text{ cm}$$

$$b_2 = 15 \text{ cm}$$

$I_i$  dB



$h_b$   
cm

15  
25  
35  
45

Brytfrekvens hos  
mjuk matta

Hz

Predikterat index för stegljudsnivå:

Kupulbjälklag i betong

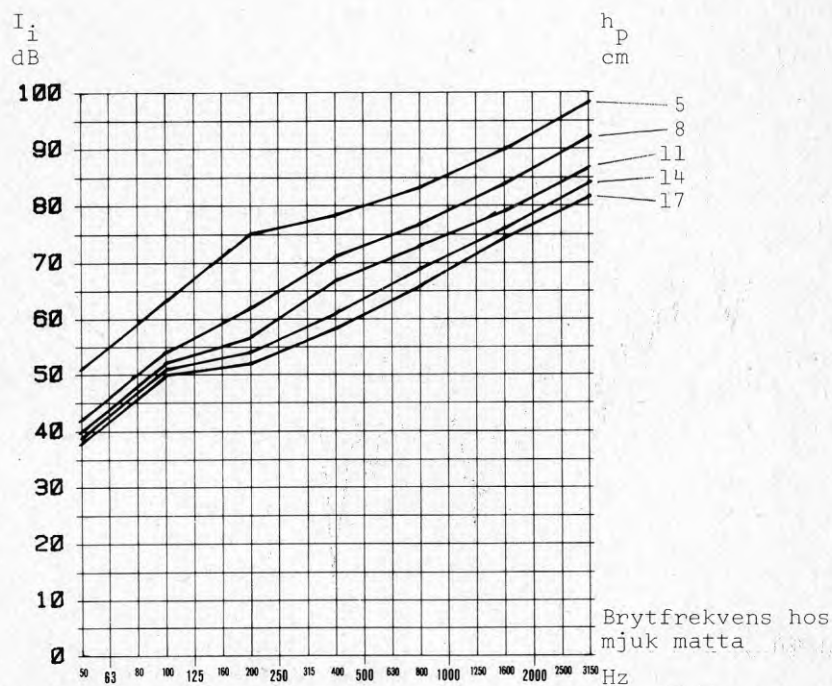
$h_p$  varierande

$h_b = 35$  cm

$s = 120$  cm

$b_1 = 23$  cm

$b_2 = 15$  cm



Bestämning av förlustfaktorer ur smalbandsanalys av  
accelerometerregistrerade bjälklagsvibrationer.

Ex: Modellbjälklag P2

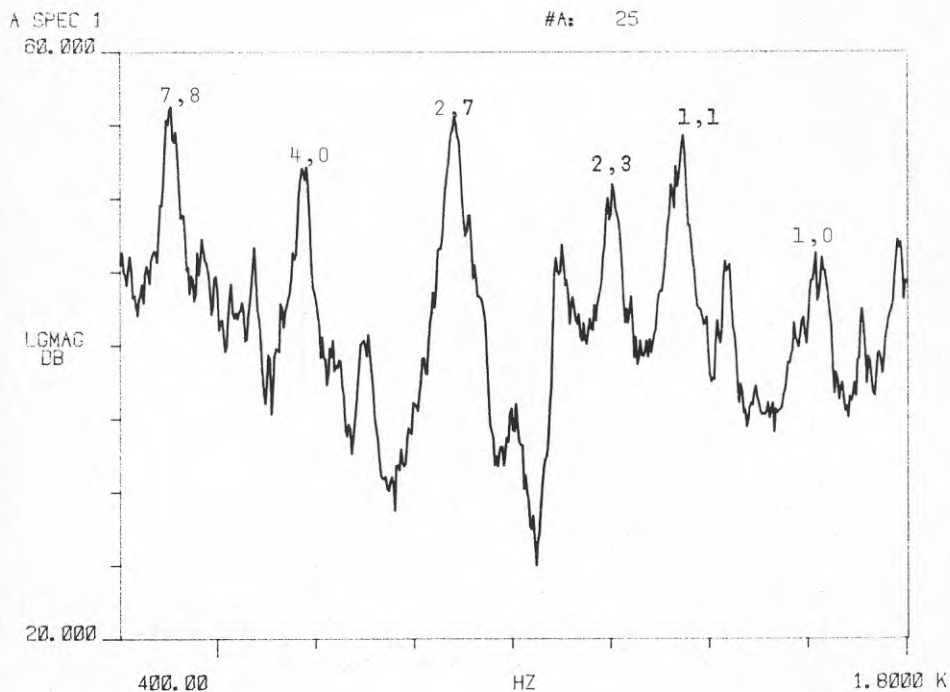
Upplösning 3,13 Hz i frekvensområdet 200-1800 Hz

$\eta = \Delta f / f_0$  anges i diagrammet i %

Spektraltäthet analyserad med Hanning-vägning

Analysator Hewlett-Packard 5420A

Vibrationshastighetsnivå dB rel.  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s



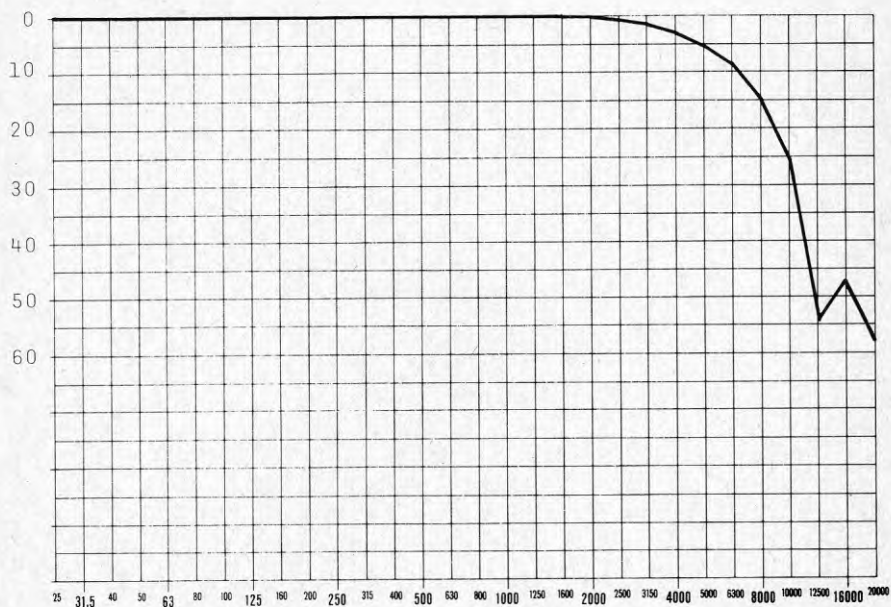


Kontaktdämpning p.g.a. lokal deformation under hammaren.

Kurvan beräknad enligt ekv. 3.8 för hammarapparatens spektrallinjer, vilka sedan adderats till tersbandsvärden. Denna dämpkurva användes i datorprogrammet.

Brytfrekvens i exemplet:  $f_o = 5000$  Hz

Dämpning  
dB



Frekvens, Hz



















**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 730641-5  
från Statens råd för byggnadsforskning till  
Ingemanssons Ingenjörbyrå AB, Göteborg.**

**R6:1979**

**ISBN 91-540-2962-7**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6600906**

**Abonnemangsgrupp:  
Z. Konstruktioner och material**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 1403  
111 84 Stockholm**

**Cirka pris: 40 kr exkl moms**